



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 3

2023



ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 3
2023

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

- О.В. Муравьева, Ю.В. Мышкин, А.А. Наговицын.** К вопросу о повышении эффективности проходного электромагнитно-акустического преобразователя продольных волн 3
- Вэй Ли, Цзяхао Чэн, Пэн Цзян, Иньхонлинь Лю.** Кластерный анализ данных акустической эмиссии слоистых композитных материалов с различной ориентацией межфазных волокон на основе модели гауссовой смеси..... 14
- Р. Гис, А. Хаммуда, А. Зиуше, Н. Бушеру, А. Шуша, Р. Халими, А. Бенмуссат.** Вихретоковый и ультразвуковой метод неразрушающего контроля эффектов охрупчивания при 475 ° С в дуплексных нержавеющих сталях и параметров коррозии 31

Радиационные методы

- В.А. Удод, С.П. Осипов, С.Ю. Назаренко.** Алгоритм оптимизации параметров сэндвич-детекторов рентгеновского излучения 44

Тепловые методы

- Д.Я. Суханов, А. Халил.** Трехмерная томография рассеивающих неоднородностей цилиндрической мультистатической зондирующей системой 59
- Информация 66

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОХОДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН

© 2023 г. О.В. Муравьева^{1,2,*}, Ю.В. Мышкин¹, А. А. Наговицын¹

¹ФГБОУ ВО Ижевский государственный технический университет имени
М.Т. Калашникова, Россия 426069 Ижевск, Студенческая, 7

²ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН, Россия 426067 Ижевск, ул. Татьяны Барамзиной, 34

*E-mail: olgak166@mail.ru

Поступила в редакцию 13.02.2023; после доработки 17.02.2023

Принята к публикации 17.02.2023

Теоретически и экспериментально исследована возможность повышения эффективности проходных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей продольных волн при изменении направления тока в высокочастотном индукторе и формировании сонаправленного (противонаправленного) включения магнитного поля индуктора относительно поляризирующего поля постоянного намагничивания. Показано, что увеличение эффективности ЭМА-преобразования за счет электродинамического механизма обусловлено локальным увеличением плотности вихревых токов по краям апертуры высокочастотного индуктора при противонаправленном включении магнитного поля. Указанные закономерности проявляются наиболее явно для образцов с высокой магнитной проницаемостью.

Ключевые слова: проходной электромагнитно-акустический преобразователь, эффективность, моделирование.

DOI: 10.31857/S0130308223030016, **EDN:** OOOZWK

ВВЕДЕНИЕ

Высокий интерес научного и промышленного сообщества к использованию бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей обусловлен их неоспоримыми достоинствами: в частности, возможность контроля через воздушный зазор без применения контактных жидкостей, в том числе в условиях высоких температур; отсутствие износа ЭМА-преобразователей; независимость результатов контроля от перекосов преобразователей относительно поверхности объекта и от наличия на поверхности изделия ржавчины, окалины, краски, загрязнений; возможность возбуждения и приема любых типов волн [1], в том числе поперечных с горизонтальной поляризацией, которые практически невозможно возбудить и принять контактным способом. Бесконтактные ЭМА-преобразователи широко используются в задачах волноводного контроля труб и листов с использованием волн Лэмба, волн горизонтальной поляризации [2—4] и волн Релея [5—8], а также пруткового проката и изделий с использованием волн Похгаммера [9]. В большинстве случаев ЭМА-методы с использованием высокочастотных поперечных и рэлеевских волн реализуют методики акустической толщинометрии [10—12], структуроскопии (контроль физико-механических свойств) [13—16], оценке накопления повреждений, анизотропии свойств и напряженно-деформированного состояния [17—19].

Возможности повышения эффективности ЭМА-преобразователей связаны, как правило, с увеличением поля внешнего подмагничивания, силы тока высокочастотного индуктора, модификации конструкций преобразователей [20—26]. Имеются сведения об использовании ЭМА-преобразователей в качестве фазированных решеток [27, 28]. Использование электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) проходного типа является одним из эффективных способов решения задач неразрушающего контроля, связанных с металлическими изделиями цилиндрической формы [29—31]. Излучение—прием продольных волн в ферромагнитных материалах с помощью ЭМА-преобразователей осложняется наличием двух механизмов преобразования (магнитострикционного и электродинамического), сложностью формирования тангенциальной составляющей поля в приповерхностном слое в зоне действия вихревых токов, а также более высокими упругими модулями среды, характеризующими распространение продольных волн (постоянные Ламе), а, следовательно, более низкими амплитудами смещений [32]. В случае проходного ЭМА-преобразователя продольных волн появляется возможность повышения эффективности за счет дополнительного воздействия магнитным полем, создаваемым импульсным током индуктора. При этом принципиальным является направление действия тока, создающее сонаправленное или противоположно направленное магнитное поле по отношению к внешнему полю подмагничивания, а также магнитные свойства объекта контроля.

Цель работы: изучить возможности повышения эффективности проходных электромагнитно-акустических преобразователей продольных волн за счет дополнительного воздействия магнитным полем, создаваемым в момент протекания электрического тока в высокочастотном индукторе, в условиях сонаправленного и противонаправленного включения магнитного поля относительно поля системы постоянного намагничивания, осуществляемого посредством электрической перекоммутации высокочастотного индуктора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При исследовании возможностей повышения эффективности проходного электромагнитно-акустического преобразователя продольных волн применен зеркально-теневой электромагнитно-акустический метод контроля [36] с использованием многократных отражений, реализованный с использованием экспериментальной установки, структурная схема которой приведена на рис. 1. Технические характеристики экспериментальной установки показаны в табл. 1.

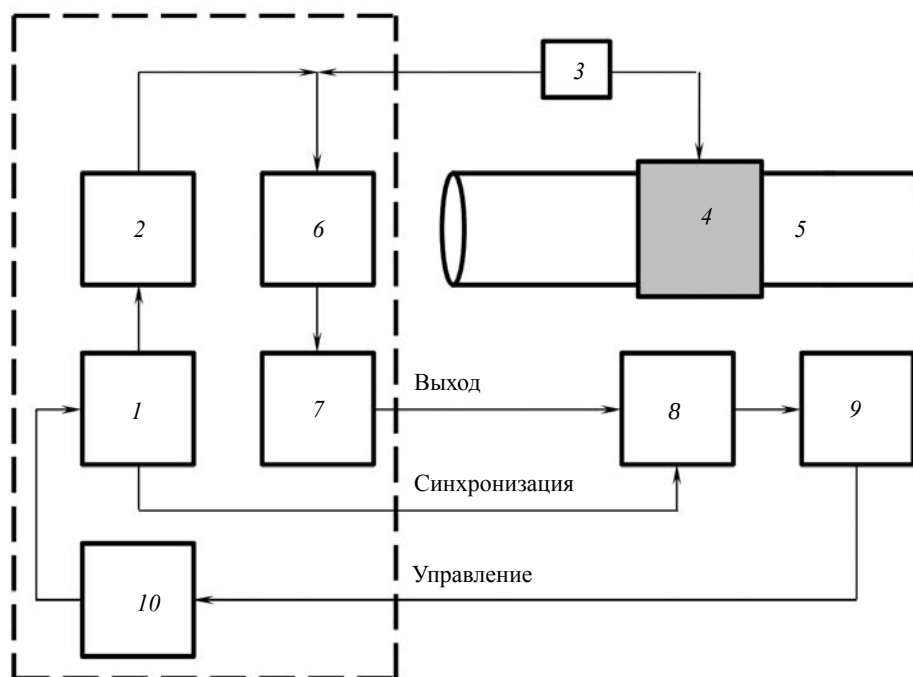


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:

1 — генератор синхрипульсов; 2 — генератор зондирующих импульсов; 3 — коммутатор; 4 — проходной ЭМА-преобразователь; 5 — образец; 6 — полосовой фильтр; 7 — высокочастотный усилитель; 8 — аналого-цифровой преобразователь; 9 — ПК; 10 — блок управления.

Таблица 1

Технические характеристики экспериментальной установки

Амплитуда зондирующего импульса	до 1,5 кВ
Коэффициент усиления	80 дБ
Уровень шумов в рабочей полосе частот	50 мкВ
Рабочая частота, МГц	2,5
Частота дискретизации	100 МГц

Принцип действия проходного ЭМА-преобразователя продольных волн представлен на рис. 2. Преобразователь состоит из постоянного кольцевого магнита (или набора магнитов) с осевой поляризацией, двух концентраторов магнитного поля в виде ферромагнитных металлических

шайб и проходной цилиндрической катушки индуктивности, размещенной в зоне действия осевой компоненты магнитного поля в пространстве между объектом контроля и магнитом. Между поверхностью объекта и индуктором и между поверхностью объекта и постоянным магнитом имеются конструктивные зазоры.

Для указанной конструкции проходного преобразователя характерно одновременное излучение продольных упругих волн из каждой точки на поверхности объекта, расположенной под индуктором. Таким образом, продольные волны распространяются во всех радиальных направлениях в поперечном сечении объекта (см. рис. 2). Многократно переотраженные по диаметру объекта импульсы акустической волны принимаются тем же преобразователем за счет обратного взаимодействия, при котором высокочастотным индуктором регистрируются электромагнитные поля, порождаемые колебаниями приповерхностного слоя объекта.

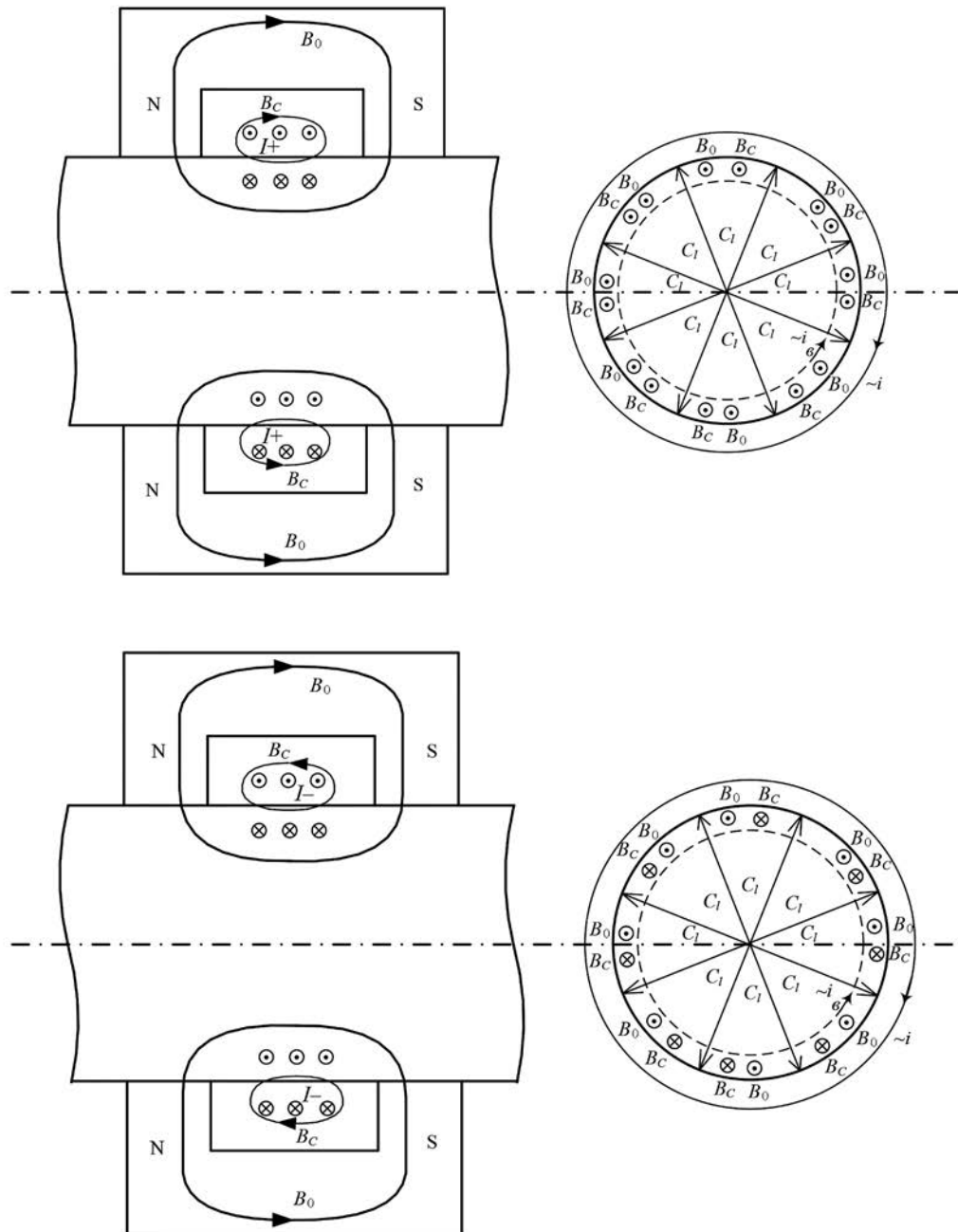


Рис. 2. Принцип действия проходного ЭМА-преобразователя продольных волн.

При использовании аperiodического импульса возбуждения можно допустить, что магнитное поле и поле вихревых токов формируется током одной полярности. Анализируются осциллограммы серии многократных отражений при сонаправленном и противоположном включении магнитного поля по отношению к полю системы постоянного подмагничивания, осуществляемого посредством электрической перекоммутации высокочастотного индуктора.

Эффективность ЭМА-преобразователя продольных волн исследована на цилиндрических образцах диаметром 14 мм из стали 40X (C — 0,38—0,43 %, Cr — 0,7—0,9 %, Mn — 0,7—0,9 %, Si — 0,15—0,30 %, S ≤ 0,04 %, P ≤ 0,035 %) с различной температурой отпуска образцов после закалки, в существенной мере оказывающей влияние на магнитные свойства стали (табл. 2) [33—35].

Таблица 2

Режимы термообработки и коэрцитивная сила образцов стали 40X

№ образца	Режимы термообработки	Коэрцитивная сила H_c , А/см
#1	Закалка в масле (855°C, 35 мин) Отпуск 570°C, 1 ч на воздухе	22
#2	Закалка в масле (855°C, 35 мин) Отпуск 220°C, 1 ч на воздухе	27

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве примера на рис. 3 приведены характерные осциллограммы серии импульсов многократных отражений продольной волны по диаметру объекта с различными режимами термообработки для различных вариантов включения.

Для исследованных образцов наблюдается увеличение амплитуд в серии импульсов многократных переотражений в условиях противоположного включения магнитного поля высокочастотного индуктора и постоянного магнитного поля. Наиболее существенный рост имеет место для

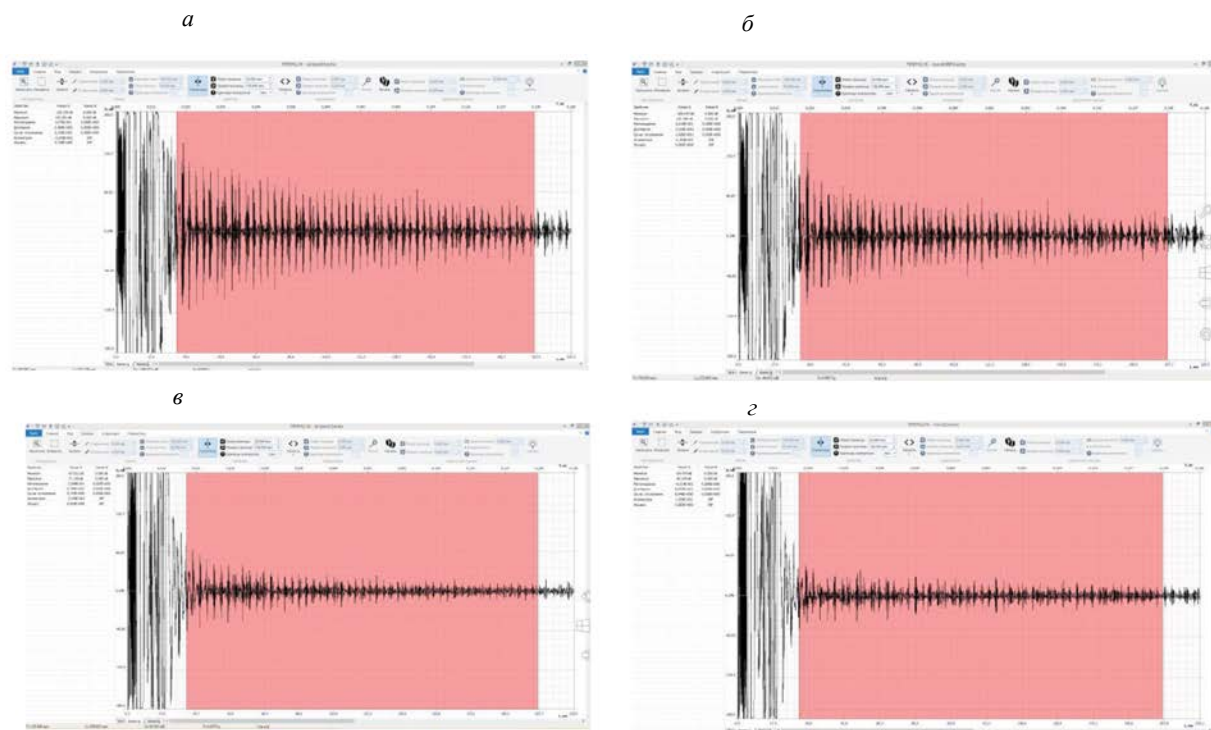


Рис. 3. Осциллограммы серии многократных отражений продольной волны по диаметру объекта при противоположном (а, в) и сонаправленном (б, г) включениях магнитного поля для образца #1 (а, б), образца #2 (в, г).

образцов с высокой температурой отпуска. Амплитуда сигнала меняется несущественно для образца после закалки и низкотемпературного отпуска.

Экспериментальную эффективность ЭМА-преобразования в условиях сонаправленного и противонаправленного включений магнитного поля оценивали как величину дисперсии D_x в серии многократных отражений, представляемых в виде последовательности данных в массиве x_n , определяемых диаметром объекта и числом анализируемых отражений $N=50$ импульсов, характеризующей рассеивание значений относительно математического ожидания m_x [30]:

$$D_x = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} (x_n - m_x)^2. \quad (1)$$

Во избежание влияния на результаты анализа зондирующего импульса соответствующий ему интервал времени удалялся из анализируемого массива (рис. 3).

С целью сравнения эффективности ЭМА-преобразования для образцов с различной термообработкой и во избежание влияния на результат затухания в образце оценивали величину среднего значения амплитуд первых четырех импульсов вне мертвой зоны.

Результаты сравнительной оценки эффективности ЭМА-преобразования для образцов с различной термообработкой при сонаправленном и противонаправленном включении поля приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты оценки эффективности ЭМА-преобразования образцов с различной термообработкой при сонаправленном и противонаправленном включении магнитного поля

№ образца	Дисперсия D_x серии многократных отражений, мВ ²		Соотношение, раз	Среднее значение напряжения U_{cp} на выходе усилителя, мВ		Соотношение, раз
	Сонаправленное включение магнитного поля	Противонаправленное включение магнитного поля		Сонаправленное включение магнитного поля	Противонаправленное включение магнитного поля	
#1	548	333	1,64	71	107	1,49
#2	80,0	94,8	1,18	31	27,4	1,14

Видно, что увеличение температуры отпуска ведет к росту эффективности ЭМА-преобразования, при этом увеличивается разница между средними значениями амплитуды эхоимпульсов при сонаправленном и противонаправленном включении магнитного поля.

Увеличение эффективности ЭМА-преобразования (амплитуды импульсов в серии многократных отражений) за счет электродинамического механизма может быть обусловлено как увеличением индукции магнитного поля в момент протекания электрического тока в индукторе, так и плотности вихревых токов, наводимых в объекте. При этом предполагается, что эффект увеличения плотности тока вносит наибольший вклад, поскольку претерпевает наибольшие изменения при изменении направления тока и существенно зависит от гистерезиса магнитных свойств ферромагнитного образца.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭМА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Анализ акустических и электромагнитных полей ЭМА-преобразователей ведется, как правило, с использованием численных методов [36—39]. С целью подтверждения результатов экспериментального исследования проведено моделирование электромагнитного поля ЭМА-преобразователя численным методом в программной среде Comsol Multiphysics и модуля AC/DC.

Задача решена в двумерной осесимметричной постановке. Двумерная геометрическая модель проходного ЭМА-преобразователя с объектом контроля включает: цилиндрический образец из стали 40X диаметром 14 мм, систему подмагничивания, состоящую из кольцевого неодимового магнита класса N52 с осевой поляризацией и двух ферромагнитных концентраторов в виде колец, трапецеидальных на верхней поверхности, с целью уменьшения размагничивающего фактора. В зазоре между объектом и неодимовым магнитом на расстоянии 0,5 мм от цилиндрической поверхности образца располагался высокочастотный индуктор, выполненный в виде 10 витков медной проволоки диаметром 0,4 мм, шириной намотки 10 мм. Функция, описывающая импульс тока намагничивания, представлена однополярным импульсом (рис. 4а) с основной частотой в спектре

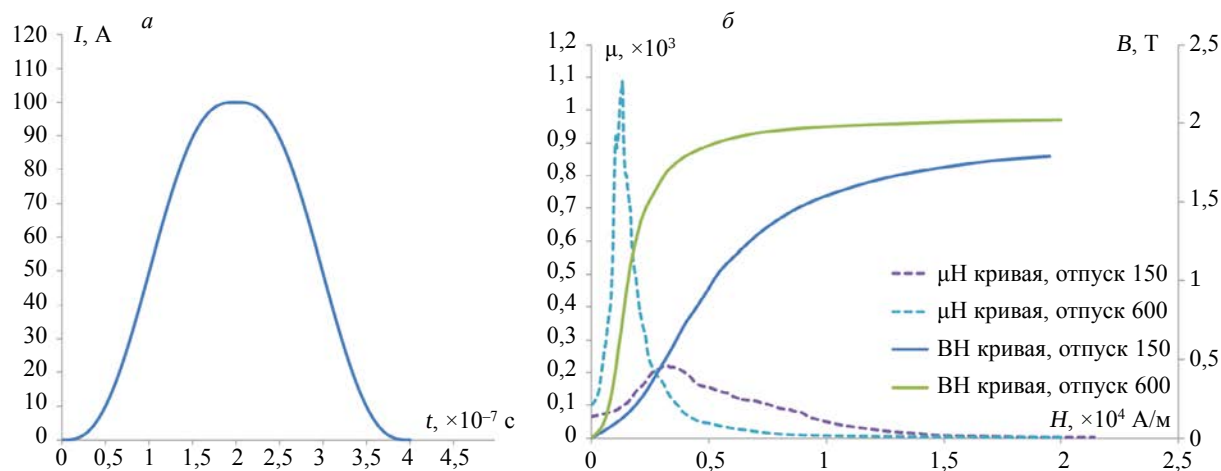


Рис. 4. Вид тока намагничивания (а), кривые намагничивания и магнитной проницаемости для стали 40Х при различной температуре отпуска (б).

2,5 МГц, током в индукторе 10 А. При этом исследовали два случая однополярного импульса тока, подаваемого на высокочастотный индуктор: с положительным ($I+$) и отрицательным ($I-$) значением тока. В случае положительного значения тока $I+$, подаваемого на высокочастотный индуктор и направленного по часовой стрелке, на поверхности образца наводятся вихревые токи, ориентированные против часовой стрелки. При этом создается дополнительное магнитное поле, сонаправленное с магнитным полем системы подмагничивания. И, наоборот, при отрицательном токе в высокочастотном индукторе ($I-$), направленном против часовой стрелки, создаваемое индуктором магнитное поле будет иметь противоположное направление с магнитным полем системы подмагничивания. Здесь и далее обозначение тока $I+$ будет использоваться для описания сонаправленного направления магнитных полей системы подмагничивания и тока индуктора, $I-$ — для описания противоположного направлений (табл. 4).

Таблица 4

Условные обозначения решаемых задач

Параметр	Условное обозначение
Сонаправленное включение магнитного поля	$I+$
Противонаправленное включение магнитного поля	$I-$
Отпуск 150 °С	T150
Отпуск 600 °С	T600
Сонаправленное включение магнитного поля, отпуск 150 °С	T150 $I+$ (вариант 1)
Сонаправленное включение магнитного поля, отпуск 600 °С	T600 $I+$ (вариант 2)
Противонаправленное включение магнитного поля, отпуск 150 °С	T150 $I-$ (вариант 3)
Противонаправленное включение магнитного поля, отпуск 600 °С	T600 $I-$ (вариант 4)

Моделирование проведено для образцов стали 40Х с температурой отпуска 150 °С и 600 °С (обозначения M150 и M600 соответственно). В качестве примера на рис. 4б представлены кривые намагничивания и дифференциальной магнитной проницаемости стали 40Х при различных температурах отпуска [40]. Видно, что максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости меняется от 1090 до 220, а поле насыщения — от 2 до 1,7 Т при уменьшении температуры отпуска после закалки.

В ходе моделирования исследовались поля вихревых токов, формируемых высокочастотным индуктором, и магнитные поля системы подмагничивания в динамическом режиме (в условиях дополнительного воздействия током высокочастотного индуктора) при сонаправленном и противонаправленном подключениях индуктора, формируемые в цилиндрических образцах стали 40Х с различными магнитными свойствами.

Распределение осевой B_z составляющей магнитной индукции в момент времени, соответствующий максимальному значению плотности вихревых токов, представлен на рис. 5а. Зависимость осевой компоненты индукции от радиуса прутка по центру высокочастотного индуктора ($r = 0$ мм) не имеет существенных отклонений для различных исследуемых вариантов. Однако под краем индуктора наблюдается более существенное уменьшение магнитной индукции. Так, в случае варианта 4 (Т600 I–) в условиях противонаправленного включения магнитного поля для образца с высокотемпературным отпуском осевая компонента магнитной индукции B_z уменьшается на 67 % по сравнению с вариантом 2 сонаправленного включения. При этом на глубине скин-слоя наблюдается выравнивание осевой компоненты магнитного поля вдоль поверхности.

Распределение вихревых токов в момент времени, соответствующий максимальной амплитуде вихревых токов, представлено на рис. 5б. Наиболее равномерное распределение вихревых токов вдоль поверхности наблюдается для варианта 1 (образец с низкой температурой отпуска при сонаправленном включении). В варианте 4 для образца с высокой температурой отпуска при противонаправленном включении максимум вихревых токов концентрируется на поверхности под краями индуктора в точке z_c , при этом на глубине скин-слоя зона перемещается в середину апертуры индуктора z_c . Чем выше магнитная проницаемость образца, тем уже поле вихревых токов на глубине скин-

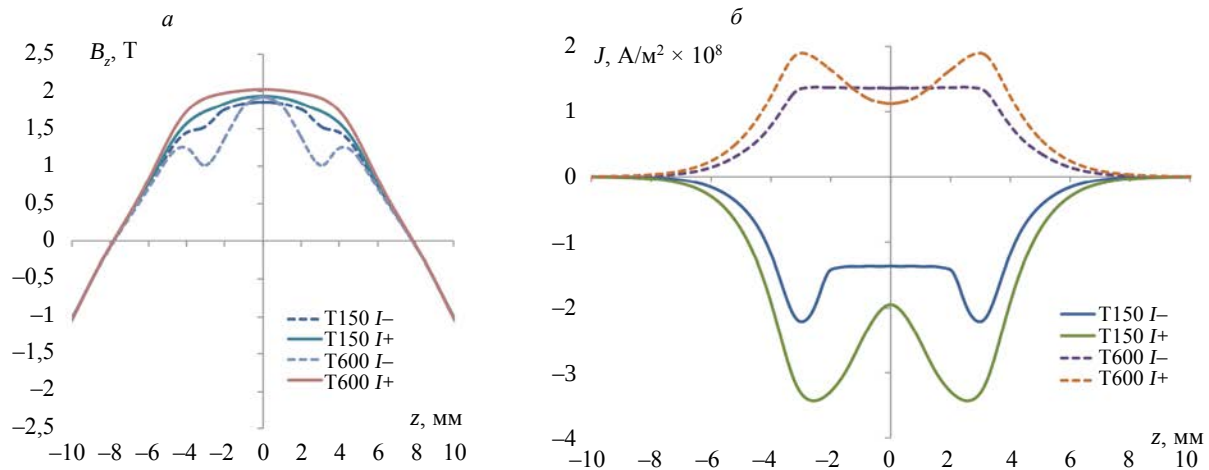


Рис. 5. Распределение осевой B_z составляющей магнитной индукции (а) и плотности вихревых токов (б) на поверхности объекта в момент времени, соответствующий максимальному значению плотности вихревых токов.

Таблица 5

Величина скин-слоя δ по центру и по краю индуктора

Положение относительно центра индуктора	δ , мкм (вариант 1)	δ , мкм (вариант 2)	δ , мкм (вариант 3)	δ , мкм (вариант 4)
$z_c = 0$ мм	68,0	91,3	67,6	39,8
$z_c = 3,15$ мм	64,0	32,4	24,0	9,2

слоя.

Распределение плотности вихревых токов по глубине (радиусу цилиндра), начиная от его поверхности, в моменты времени, соответствующие максимальному значению плотности вихревых токов, имеют вид экспоненциальных зависимостей, характерных для закона ослабления вихревых токов с глубиной (рис. 6). При этом показатель экспоненты, характеризующий глубину скин-слоя, различен для различных режимов термообработки и вариантов включения индуктора, а также зоны индуктора (по центру и краю). Значения глубины скин-слоя δ , определяемые расстоянием, на котором выполняется условие уменьшения плотности тока в e раз, по сравнению с мак-

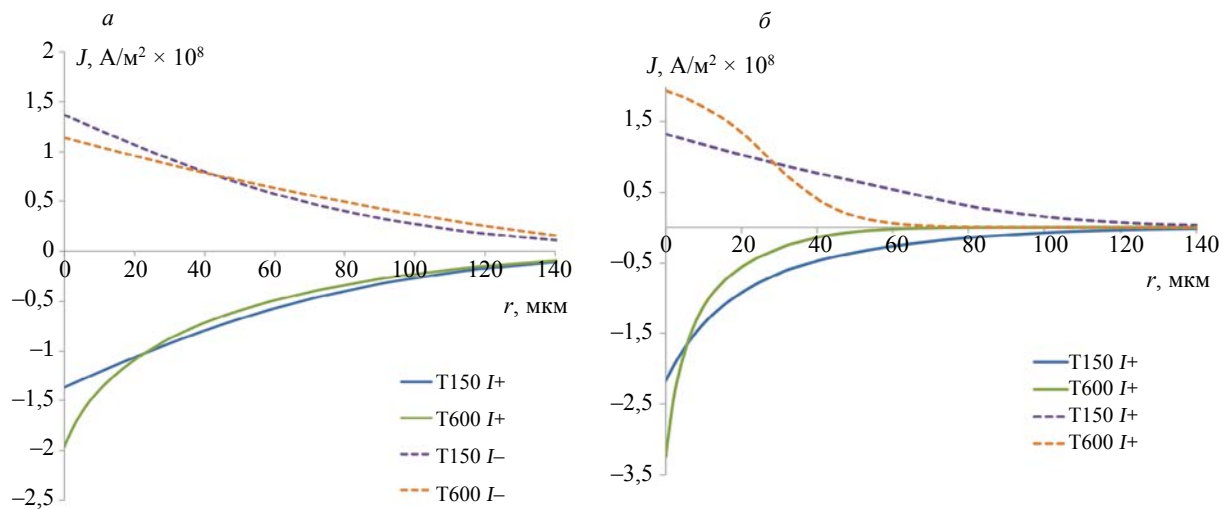


Рис. 6. Распределение плотности вихревых токов по радиусу объекта по центру z_c (а) и по краю z_e (б) в момент времени, соответствующий максимальному значению плотности вихревых токов.

симальным значением на поверхности, указаны в табл. 5.

Видно, что минимальное значение скин-слоя соответствует варианту 4 (Т600 I–), при этом плотность тока максимальна. Максимальное значение скин-слоя и минимальное значение плотности наблюдается для варианта 2 (Т600 I+). При этом для вариантов 1 и 3 для низкотемпературного отпуска скин-слой практически не изменяется. Следует отметить, что по краю индуктора различие в глубине скин-слоя и амплитудах вихревых токов более существенно. Существенные различия в указанных зависимостях объясняются различиями в магнитной проницаемости и концентрацией вихревых токов на участках объекта с резким изменением индукции магнитного поля. Наличие зон концентрации вихревых токов под краями индуктора связано с более высокой магнитной проницаемостью и не противоречит закону Фарадея.

Для оценки объемной плотности пондеромоторных сил, характеризующих эффективность ЭМА-преобразования, проведена интегральная оценка средних по апертуре преобразователя значений магнитной индукции и плотности вихревых токов в момент времени, соответствующий

Таблица 6

Результаты оценки средних по апертуре преобразователя значений магнитной индукции, плотности вихревых токов и объемной плотности пондеромоторных сил

Характеристика	Направление тока и температура отпуска				Отношение, раз	Отношение, раз
	I–		I+			
	T150	T600	T150	T600	T150	T600
Магнитная индукция, Т	–1,62	–1,53	1,71	1,82	0,95	0,84
Плотность вихревых токов, ×10 ⁹ А/м ²	–0,128	–0,215	0,116	0,118	1,1	1,82
Объемная плотность сил, ×10 ⁹ Н/м ³	0,208	0,329	0,198	0,216	1,05	1,52

максимуму амплитуды вихревых токов (табл. 6).

Рассчитанные значения соотношений плотности пондеромоторных сил для вариантов сонаправленного и противоположного включений в образцах с различной температурой отпуска показывают удовлетворительное согласование с результатами экспериментальных исследований (см. табл. 1) и говорят об адекватности предложенной модели описания полей проходного электромагнитно-акустического преобразователя продольных волн.

ВЫВОДЫ

Таким образом, теоретически и экспериментально исследована возможность повышения эффективности проходных электромагнитно-акустических преобразователей продольных волн в образцах стали 40Х с различной термообработкой за счет дополнительного воздействия магнитным полем, создаваемым в момент протекания электрического тока в высокочастотном индукторе, в условиях сонаправленного и противонаправленного включения магнитного поля относительно поля системы постоянного намагничивания, осуществляемого посредством электрической перекоммутации высокочастотного индуктора.

Показано, что увеличение эффективности ЭМА-преобразования за счет электродинамического механизма обусловлено в первую очередь увеличением плотности вихревых токов, наводимых в объекте при противонаправленном включении магнитного поля, что объясняется концентрацией вихревых токов по краям апертуры высокочастотного индуктора и связано с резким изменением индукции магнитного поля в данной области. Указанные закономерности проявляются наиболее явно для образцов с низкой температурой отпуска (высокой магнитной проницаемостью).

Степень влияния магнитного поля высокочастотного индуктора на эффективность ЭМА-преобразования может отличаться для сталей различных марок и их магнитных свойств, а также зависит от конструктивных особенностей ЭМА-преобразователя с точки зрения формирования поля подмагничивания (его равномерности) в зоне действия вихревых токов.

Таким образом, при проектировании ЭМА-преобразователей с высокой эффективностью требуется анализ совместного влияния магнитного поля системы подмагничивания и высокочастотного индуктора в материале объекта контроля с данными магнитными свойствами.

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. Hirao M., Ogi H. *Electromagnetic Acoustic Transducers*. Springer. 2017. P. 360. DOI: 10.1007/978-4-431-56036-4
2. Liu T., Jin Y., Pei C., Han J., Chen Z. A compact guided-wave EMAT with pulsed electromagnet for ferromagnetic tube inspection // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2020. V. 64. No. 1—4. P. 951—958. DOI: 10.3233/JAE-209409
3. Munoz C.Q.G., Jimenez A.A., Marquez F.P.G., Kogia M., Cheng L., Mohimi A., Papaelias M. Cracks and Welds Detection Approach in Solar Receiver Tubes Employing EMATs // *Structural Health Monitoring*. 2017. <https://doi.org/10.1177/1475921717734501>
4. Муравьева О.В., Муравьев В.В. Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката // *Дефектоскопия*. 2016. № 7. С. 3—11.
5. Aleshin N.P., Krysko N.V., Kusyy A.G., Skrynnikov S.V., Mogilner L.Yu. Investigating the Detectability of Surface Volumetric Defects in Ultrasonic Testing with the Use of Rayleigh Waves Generated by an Electromagnetic-Acoustic Transducer // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022. V. 57. No. 5. P. 361—368. [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. 22—30. DOI: 10.31857/S0130308221050031]
6. Aleshin N.P., Krysko N.V., Skrynnikov S.V., Kusyy A.G. Studying Detectability of Plane Surface Defects by Ultrasonic Method Using Rayleigh Waves // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 6. P. 446—454. [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. DOI: 10.31857/S0130308221060038]
7. Муравьев В.В., Гущина Л.В., Казанцев С. Оценка накопленной поврежденности шеек осей колесных пар вагонов ультразвуковым методом с использованием рэлеевских и головных волн // *Дефектоскопия*. 2019. № 10. С. 14—23. DOI: 10.1134/S0130308219100026
8. Муравьева О.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В., Синцов М.А., Мышкин Ю.В., Башарова А.Ф. Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента // *Дефектоскопия*. 2020. № 12. С. 48—57. DOI: 10.31857/S0130308220120052.
9. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Стрижак В.А., Мурашов С.А., Пряхин А.В. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов. Издательство Сибирского отделения РАН, 2017.

С. 234.

10. *Karayeva S.D., Bergander M.J., Vakhguel't A., Khairaliyev S.* Remaining life assessment for boiler tubes affected by combined effect of wall thinning and overheating // *Journal of Vibroengineering*. 2017. V. 19. No. 8. P. 5892—5907. DOI: 10.21595/jve.2017.18219

11. *Аишихин Д.С., Федоров А.В.* Исследование влияния параметров электромагнитно-акустического преобразователя на точность измерения толщины изделий // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2022. Т. 22. № 2. С. 376—384. DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-376-384

12. *Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кропачев О.Ю., Плеснецов С.Ю., Билык З.В., Хорошайло Ю.Е., Ефименко С.А., Салам Б.* Бесконтактный спектральный экспресс-способ обнаружения коррозионных повреждений металлоизделий // *Дефектоскопия*. 2020. № 1. С. 14—21. DOI: 10.31857/S0130308220010029

13. *Бабкин С.Э.* Определение скорости основных типов акустических волн в металлах приставным датчиком // *Дефектоскопия*. 2020. № 4. С. 32—39. DOI: 10.31857/S0130308220040041

14. *Murav'eva O., Murav'ev V., Volkova L., Kazantseva N., Nichipuruk A., Stashkov A.* Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology // *Additive Manufacturing*. 2022. V. 51. P. 102635. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102635

15. *Федорова Н.В., Леньков С.В.* Исследование магнитоупругих свойств аморфно-кристаллического сплава $Fe_{73.7}Cu_{1.0}Nb_{3.2}Si_{12.7}B_{9.4}$ и методика эксперимента при использовании электромагнитно-акустического преобразования // *Химическая физика и мезоскопия*. 2020. Т. 22. № 4. С. 448—457. DOI: 10.15350/17270529.2020.4.42

16. *Муравьев В.В., Бурдин А.Ю., Синцов М.А.* Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и Рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18. № 4. С. 4—10. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-10

17. *Волкова Л.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В.* Неравномерность акустической анизотропии толстолистового стального проката // *Сталь*. 2021. № 5. С. 36—41.

18. *Булдакова И.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В.* Распределение напряжений в образцах труб магистральных газопроводов со сварным соединением // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18. № 1. С. 4—8. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-4-8

19. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Бурдин А.Ю., Синцов М.А., Зорин А.В.* Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2019. Т. 22. № 1. С. 37—44. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-37-44

20. *Liu Z., Deng L., Zhang Y., Li A., Bin W., He C.* Development of an omni-directional magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer // *NDT & E International*. 2020. V. 109. P. 102193. DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.102193

21. *Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кропачев О.Ю.* Портативный накладной прямой совмещенный электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвукового контроля через диэлектрические слои толщиной до 20 мм на поверхности ферромагнитных металлоизделий // *Дефектоскопия*. 2022. № 5. С. 13—23. DOI: 10.31857/S0130308222050025

22. *Злобин Д.В., Муравьева О.В.* Особенности построения аппаратуры электромагнитно-акустической дефектоскопии пруткового проката с использованием стержневых волн // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2012. № 4 (56). С. 99—104.

23. *Rieger K., Erni D., Rueter D.* Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs // *NDT & E International*. 2022. V. 125. P. 102569. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102569

24. *Ren W., He J., Dixon S., Xu K.* Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018. V. 274. P. 189—198. DOI: 10.1016/j.sna.2018.03.010

25. *Xiang L., Dixon S., Thring C.B., Li Z., Edwards R.S.* Lift-off performance of electromagnetic acoustic transducers (EMATs) for surface acoustic wave generation // *NDT & E International*. 2022. V. 126. P. 102576. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102576

26. *Tu J., Zhong Z., Song X., Zhang X., Deng Z., Liu M.* An external through type RA-EMAT for steel pipe inspection // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. V. 331. P. 113053. DOI: 10.1016/j.sna.2021.113053

27. *Liu H., Liu T., Yang P., Liu Y., Gao S., Li Y., Li T., Waang Y.* Design and experiment of array Rayleigh wave-EMAT for plane stress measurement // *Ultrasonics*. 2022. V. 120. P. 106639. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106639

28. *Tkocz J., Greenshields D., Dixon S.* High power phased EMAT arrays for nondestructive testing of as-cast steel // *NDT & E International*. 2019. V. 102. P. 47—55. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.11.001

29. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Петров К.В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн // *Дефектоскопия*. 2017. № 8. С. 20—28.

30. *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-теневоего метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката // Дефектоскопия. 2022. № 8. С. 36—51.]

31. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Кокорина Е.В., Лойферман М.А. Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков-заготовок при производстве пружин // В мире неразрушающего контроля. 2013. № 1 (59). С. 52—60.

32. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2004. 135 с. ISBN 5-94052-061-X.

33. Костин В.Н., Василенко О.Н., Сандомирский С.Г. Структурная чувствительность параметров несимметричного цикла «коэрцитивный возврат—намагничивание» термообработанных низкоуглеродистых сталей // Дефектоскопия. 2018. № 11. С. 36—42. DOI: 10.1134/S0130308218110052

34. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. V. 118. P. 102398. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102398

35. Serbin E.D., Kostin V.N., Vasilenko O.N., Ksenofontov D.G., Gerasimov E.G., Terentev P.B. Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics of low-carbon steel and diagnostics of its structural state // NDT & E International. 2020. V. 116. P. 102330. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102330

36. Wang S., Kang L., Li Z., Zhai G., Zhang L. 3-D modeling and analysis of meander-line-coil surface wave EMATs // Mechatronics. 2012. V. 22. No. 6. P. 653—660. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2011.04.001

37. 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

38. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. part 2 // Technical Electrodynamics. 2018. № 1. P. 30—36. DOI: 10.15407/techned2018.01.030

39. Li Y., Liu Z., Miao Y., Yuan W., Liu Z. Study of a spiral-coil EMAT for rail subsurface inspection // Ultrasonics. 2020. V. 108. P. 106169. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106169

40. Сандомирский С.Г. Использование параметров предельной петли гистерезиса для синтеза структурочувствительных магнитных параметров сталей // Контроль. Диагностика. 2017. № 11. С. 26—31. DOI: 10.14489/td.2017.11.pp.026-031

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ МЕЖФАЗНЫХ ВОЛОКОН НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ГАУССОВОЙ СМЕСИ

© 2023 г. Вэй Ли¹, Цзяхао Чэн¹, Пэн Цзян^{1,*}, Иньхонлинь Лю¹

¹Северо-восточный нефтяной университет, Дацин, 163318, Китай

E-mail: perujp_2022@163.com

Поступила в редакцию 17.12.2022; после доработки 03.02.2023

Принята к публикации 03.02.2023

Целью настоящего исследования был поиск более эффективного метода кластеризации событий акустической эмиссии. Сигналы акустической эмиссии композитных слоистых композитных материалов с различной ориентацией межфазных волокон были получены в ходе экспериментов с двухконсольной балкой (ДКБ). В результате выделения признаков из предварительно обработанных данных с помощью алгоритма Relief F было установлено, что большая часть информации в сигналах акустической эмиссии может быть представлена амплитудой, обратной частотой, центральной частотой, пиковой частотой и так далее. Впоследствии для кластеризации данных с уменьшенной размерностью был применен метод анализа главных компонент и модели «ожидание—максимизация» и гауссовой смеси. С помощью этого метода можно не только выделять различные механизмы повреждения, но и показывать уровень концентрации повреждений в зависимости от их типа. Кроме того, как только кластеры были разделены по различным механизмам повреждений, их можно было точно идентифицировать, используя амплитуду и пиковую частоту. Наконец, на основе кривых нагружения четырех типов образцов проводили сравнение и анализ кумулятивных событий и энергий акустической эмиссии, а также были определены различные механизмы повреждения.

Ключевые слова: ламинированные композиты, акустическая эмиссия, Relief F, выделение признаков OM-MGC, определение параметров повреждений.

DOI: 10.31857/S0130308223030028, EDN: OORIQL

1. ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своим выдающимся свойствам композиты из стекловолокна широко используются в таких областях, как гражданское строительство, автомобильная промышленность и аэрокосмическая техника. В большинстве случаев эти композиты подвергаются комплексным нагрузкам [1], и механизмы их повреждения и разрушения часто сопровождаются комплексными явлениями. Поэтому при изучении поведения при разрушении композитов из стекловолокна важно определять параметры повреждений и их эволюцию [2, 3].

Было доказано, что с помощью метода акустической эмиссии (АЭ) можно обнаруживать даже микроповреждения, вызванные в композитных материалах, и что он обладает хорошей чувствительностью к микроскопическим повреждениям. Как метод неразрушающего контроля, АЭ может осуществлять непрерывный мониторинг в реальном времени упругих волн, образующихся при микроповреждениях (таких как растрескивание матрицы, расслаивание и разрушение волокон) во время нагружения.

Saeedifar и др. использовали АЭ для изучения межслойных повреждений, вызванных вдавливающими нагрузками в углеродно-эпоксидно-ламинированных композитах. Сравнивая эффективность различных методов кластеризации, иерархическая модель была использована для кластеризации сигналов АЭ [4]. Повреждения материалов также могут быть обнаружены с помощью мод S0 и A0 волн Лэмба. Yu и др. применили широкополосный фазосдвигающий оптико-волоконный датчик с решеткой Брэгга с высокой чувствительностью для анализа методом АЭ композитных материалов. Характеристики мод сигналов АЭ повреждений были количественно оценены с помощью соотношения амплитуд и пиковых частот мод S0 и A0, затем были определены три типа повреждений [5]. Agumugam и др. определили различные механизмы разрушения двунаправленных стеклоэпоксидных ламинатов, нагруженных при растяжении, путем параметрического исследования скорости счета АЭ и суммарных счетов, а также с помощью метода нечеткой кластеризации C-средних (МКСС), связанного с методом главных компонент (МПК) [6]. Fotouhi и др. провели испытания двухконсольной балки (ДКБ), испытания на изгиб образца с краевым расслоением и испытание на изгиб в смешанном режиме в плетеных и однонаправленных (ОН) укладках. Для идентификации событий АЭ, вызванных различными механизмами повреждения, были использованы

пакетное вейвлет-преобразование и МНКСС, связанный с МГК. Они обнаружили, что доминирующие механизмы повреждения во всех образцах могут быть отнесены к растрескиванию матрицы и отслаиванию волокна от матрицы [7]. Из вышеупомянутых исследований можно сделать вывод, что кластерный анализ остается одним из наиболее широко используемых методов исследования. Однако, учитывая природу композитных материалов, в ходе экспериментов необходимо собирать и анализировать значительное количество высокоразмерных сигналов АЭ. Поэтому при кластерном анализе решающее значение имеют следующие три фактора: выбор признаков, выбор алгоритма и проверка результатов кластеризации [8].

Измеряемые параметры АЭ представляют собой подробную информацию о собранном сигнале. Однако использование этих параметров без каких-либо критериев отбора может привести к появлению избыточной информации при идентификации повреждений, что значительно увеличивает объем вычислений. Поэтому выбор характеристик имеет большое значение. Для кластерного анализа многие ученые в качестве критериев отбора рассматривают амплитуду, время нарастания сигнала, длительность, количество и пиковую частоту [9—12]. Для одного механизма повреждения, такого как матричное растрескивание, амплитуда может находиться в очень широком диапазоне, некоторые из которых могут перекрываться с амплитудами других механизмов повреждения. Связь между сигналом АЭ и конкретным механизмом повреждения не может быть определена, полагаясь только на один параметр. Поэтому механизмы повреждения должны быть определены на основе соответствующих множественных характеристик. Согласно Ely и Hill [13], сигналы с высокой амплитудой, высокой энергией и большой длительностью указывают на разрушение волокна, в то время как сигнал противоположного характера связан с растрескиванием матрицы. Тип повреждения также может быть охарактеризован длительностью и амплитудой. При испытании труб, армированных волокном, расслоение и отслоение характеризуются большой продолжительностью и низкой амплитудой, в то время как разрушение волокна характеризуется короткой продолжительностью и высокой амплитудой [14]. Nagizi и др. использовали классификацию по методу k -средних, связанную с четырьмя коррелированными характеристиками (время нарастания, счет, амплитуда и абсолютная энергия) для различения различных механизмов повреждения. Кроме того, на основе МГК и самоорганизующейся карты Кохонена с помощью АЭ отслеживалось повреждение композита, возникающее при нагружении. Barile и др. провели отбор признаков на основе критериев Лапласа, чтобы выбрать наиболее подходящие признаки перед тем как воспользоваться признаками АЭ. Затем отобранные признаки были проанализированы с помощью алгоритма кластеризации по методу k -средних. Результаты показали, что амплитуда сигнала АЭ сильно коррелирует с центроидом частоты, что может быть использовано для определения типа повреждения [15]. Кроме того, алгоритм отбора признаков обеспечивает исследователей достаточной теоретической поддержкой для выбора параметров, что не только делает выбранные параметры более убедительными, но и значительно увеличивает скорость расчета. Jain и Singh создали эффективный гибридный метод отбора признаков для уменьшения размерности, в котором были использованы как МГК, так и Relief F. Этот метод был протестирован на наборе данных по хроническим заболеваниям, и были получены отличные результаты отбора признаков [16]. Насколько нам известно, данное исследование является первым, в котором этот метод применяется к композитам из стекловолокна для отбора признаков.

Широкое распространение получили некоторые методы кластеризации, такие как: метод k -средних; основанная на плотности пространственная кластеризация для приложений с шумами; спектральная кластеризация; модель гауссовой смеси (МГС); сдвиг среднего и иерархическая кластеризация. События АЭ происходят случайным образом, что может быть хорошо описано с точки зрения вероятности. В МГС вероятность попадания в определенную кластерную группу может быть рассчитана для всех точек данных, каждая из которых маркируется в соответствии с наибольшей вероятностью. Кроме того, МГС демонстрирует высокую устойчивость и может быть применен даже к нелинейным наборам данных, поэтому является подходящим методом для изучения механизма повреждения композитных ламинатов из стекловолокна.

В целом, в данном исследовании отбор признаков и объединение признаков многомерных параметров АЭ выполняются для композитных ламинатов с различной ориентацией межфазных волокон с использованием алгоритма Relief F и МГК. Затем алгоритм OM-GMM используется для кластеризации репрезентативных новых признаков, а результаты сравниваются с результатами, полученными для других широко используемых методов кластеризации. Наконец, возникновение и распространение повреждений анализируется на основе кривых нагружения и суммарных характеристик АЭ, что позволяет распределить механизм повреждения по различным кластерам.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Материалы

В эксперименте с единичным повреждением использовали матрицу для заливки эпоксидной смолы в форме гантели с размерами $250 \times 25 \times 2,5$ мм и стекловолокно SC-1200, как указано в ASTM D-2343 [17]. Свойства матрицы и волокон приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства стекловолокна и матрицы из эпоксидной смолы

	Предел прочности, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Удлинение, %	Плотность, кг/м ³	Коэффициент Пуассона
Матрица из эпоксидной смолы	0,12	3	0.2	980	0,38
Стекловолокно	0,28	90	3,5	1,800	0,3

Композитные ламинаты с 24-слойной структурой и конфигурацией укладки $(02/\pm 30/\pm 45/\pm 60)_3$, с углами ориентации 0 (однонаправленные (ОН) ламинаты), 30, 45 и 60° использовали для испытаний на расслаивание ДКБ [18]. В соответствии с инструкциями ASTM D5528(2021) [19], ламинаты из смолы с размерами $25 \times 175 \times 4,8$ мм были получены методом вакуумного литья, как показано на рис. 1. Свойства стекловолокна и эпоксидной смолы (TDE-85#) приведены в табл. 2. В процессе укладки тонкая пленка из политетрафторэтилена (ПТФЭ) толщиной 40 мкм и шириной 20 мм была вставлена между 12-м и 13-м ламинатом для создания начальной трещины расслоения. Для устранения разрушения края матрицы образец был отполирован наждачной бумагой с зернистостью 120.

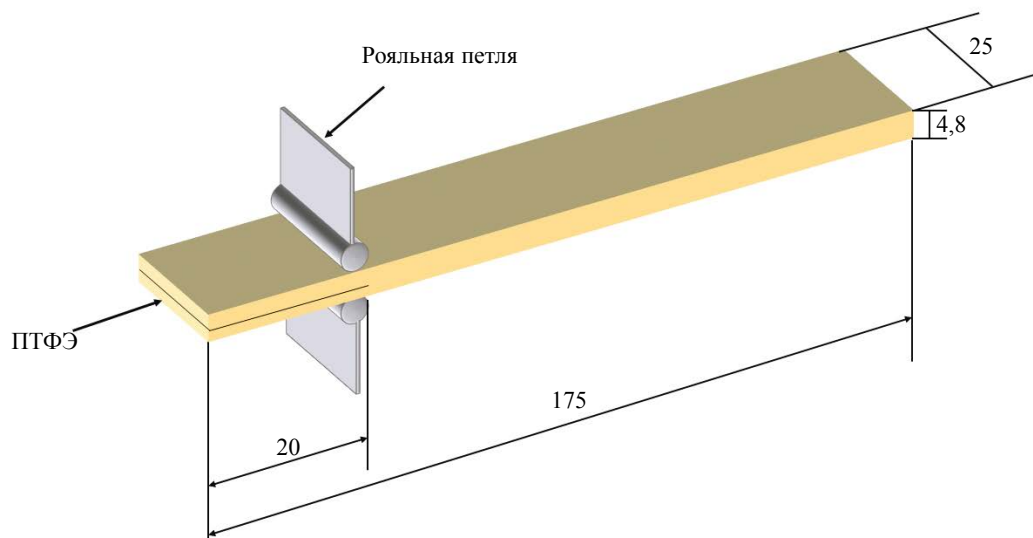


Рис. 1. Геометрические параметры образца ДКБ.

2.2. Методы испытаний

Образец матрицы растягивали с помощью электронной универсальной испытательной машины Shimadzu AG-X, как показано на рис. 2а. Свойства пучка стекловолокна (SC-1200) оценивали

Таблица 2

Механические свойства материалов

	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа
S-стекловолокно	3,400	120
Эпоксидная смола (TDE-85#)	60	3,7

с помощью растягивающей машины типа SEM-тестера, как указано в стандарте ASTM D-2343 (рис. 2б).

Испытания ДКБ проводили в соответствии со стандартом ASTM D5528 (2021). Оборудование для испытаний ДКБ и оборудование для сбора данных АЭ показаны на рис. 2в. Кривые нагрузки—перемещения, время нагрузки и кривые напряжения—деформации поперечины были записаны с помощью универсальной испытательной машины. Цифровая камера с большим оптическим зумом была установлена для отслеживания зарождения и развития трещины в процессе испытания. Образец был закреплен на испытательной машине с помощью ролевой петли, а два датчика АЭ, которые записывали сигналы о повреждении во время испытания образца со скоростью подачи 1 мм/мин при комнатной температуре, были размещены над образцом.

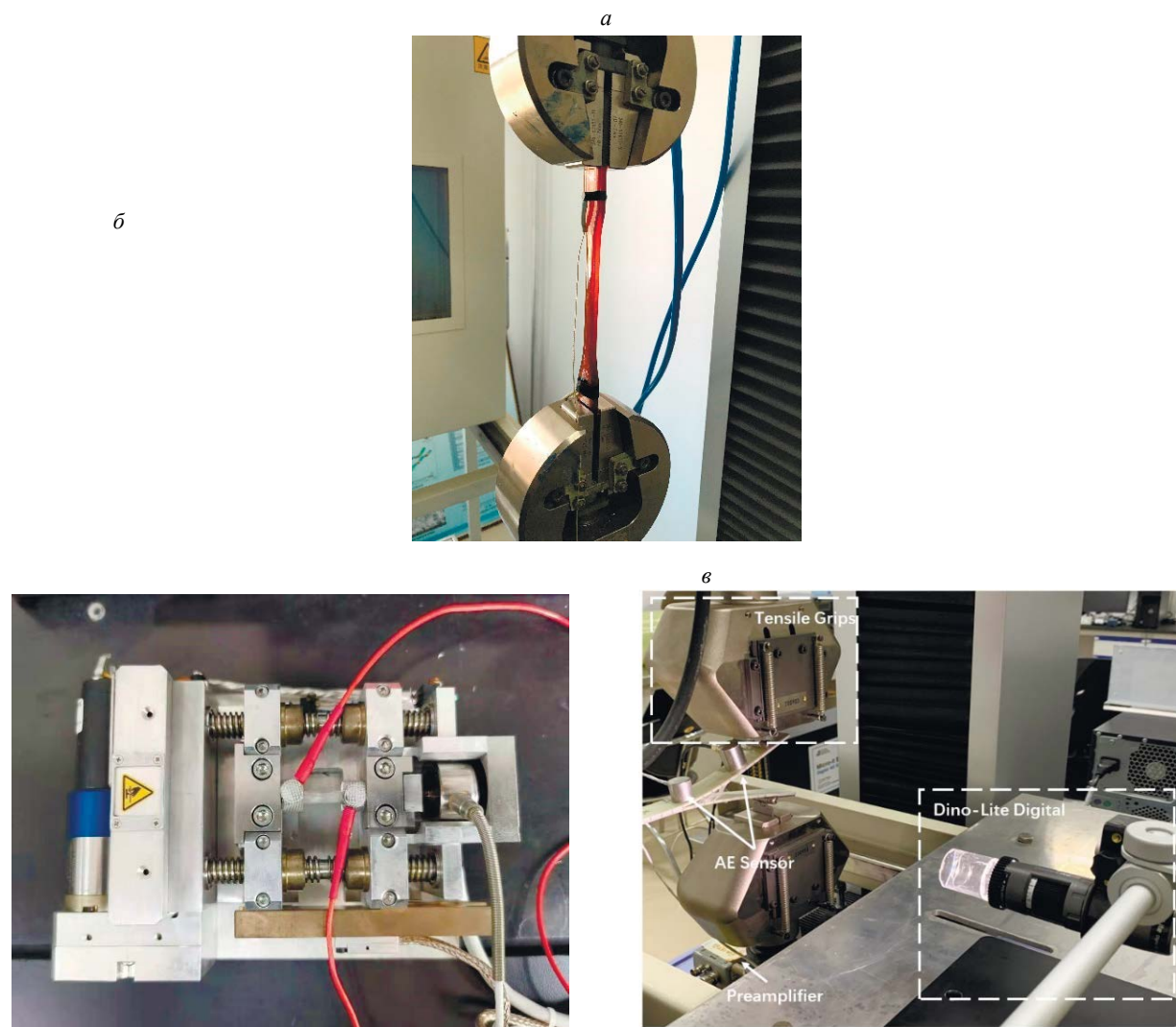


Рис. 2. Испытательное оборудование и оборудование для сбора данных АЭ: испытание на растяжение матрицы (а); испытание на растяжение гантели из стекловолокна (б); испытание ДКБ (в).

Для регистрации событий АЭ использовалось программное обеспечение AE Win и устройство, произведенное компанией Acoustical Physics Corporation of America-Express. Датчиками АЭ были WSa, WD и Nano30, а сигналы АЭ усиливались с помощью предварительного усилителя 2/4/6-AST с коэффициентом усиления 40 дБ и частотой дискретизации 1 МГц. Для обеспечения хорошей акустической связи между поверхностью датчика и образцом наносилась вакуумная смазка. Перед испытаниями соединение между образцом и датчиком АЭ проверялось в соответствии со стандартной процедурой испытаний на разрыв карандашного грифеля; настройки системы АЭ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры системы АЭ

	Тип сенсора	Количество каналов	Порог, дБ	Время задержки, мкс	Частота дискретизации, МГц
Испытание на растяжение матрицы	WD	2	35	256	1
Испытание на растяжение стекловолокна	Nano30	2	35	256	1
ДКБ	WD WSa	2	35	256	1

2.3. Отбор признаков

Целью отбора признаков является удаление нерелевантных и избыточных характеристик, что позволяет создать новый набор данных с меньшим количеством измерений при сохранении большей части информации. Для этого из исходного набора данных были удалены ненужные, нежелательные и нерелевантные признаки. Алгоритм Relief F был предложен Кононенко [20] и разработан на основе алгоритма Relief. Алгоритм Relief F может решать различные проблемы и является широко используемым методом отбора признаков в интеллектуальном анализе данных. По сравнению с методом Relief, алгоритм Relief F может быть распространен на многие другие области. Шаги для процесса обучения по алгоритму Relief F следующие:

1. Задать весовые коэффициенты равными 0.
2. Выбрать случайный образец.
3. Найти ближайших соседей из того же класса (ближайшие совпадения).
4. Найти ближайших соседей из другого класса (ближайшие промахи).
5. Применить формулу оценки веса на основе значений, полученных на шагах 2—4.

Параметры, получаемые при работе системы, и их описания приведены в табл. 4; другие параметры включают длительность/амплитуду, амплитуду/начальную частоту, амплитуду/центральный частоту, время нарастания/амплитуду, время нарастания/длительность, амплитуду/частоту, амплитуду/среднюю частоту, A/PF, C/D, C/RT, PF/D, PF/RT, E/D и C/E [21]. Наборы данных с вышеуказанными параметрами были обработаны с помощью алгоритма Relief F для получения релевантных и полезных характеристик. Согласно предыдущему анализу параметров и формы сигналов, в испытаниях ДКБ частоты в диапазоне 350—500 Гц можно отнести к разрушению волокна, частоты в диапазоне 80—120 кГц можно отнести к разрушению матрицы, а остальные частоты связаны с повреждениями отслоения [22]. Таким образом, исходные данные были предварительно обработаны перед проведением анализа Relief F.

2.4. Кластеризация данных при использовании ОМ-МГС

МГС — это расширение функции плотности вероятности одного Гаусса. Поскольку МГС может плавно аппроксимировать плотность распределения любой формы, она была применена к различным областям, таким как распознавание аудио и изображений, и при этом удалось получить примечательные результаты. МГС — это метод мягкой кластеризации, в котором для оценки функции плотности вероятности (ФПВ) используются линейные аппроксимации нескольких гауссовских компонент [23].

ФПВ K -го порядка МГС — взвешенная сумма конечной гауссовской функции распределения вероятностей [24]. Для импульса АЭ x_i^n , ГМС выражается как:

Таблица 4

Параметры и их описания [21]

Параметры	Описание
Время нарастания, RT	Время от первого пересечения порога до самой высокой точки напряжения на осциллограмме
Счеты, C	Количество раз, когда сигнал пересекает установленный порог
Энергия, E	Интеграл абсолютного напряжения сигнала по времени
Длительность, D	Время от первого до последнего пересечения порога
Амплитуда, A	Наибольшее напряжение в форме волны АЭ, выраженное в дБ
Средняя частота, AF	Счеты, деленные на продолжительность, деленные на 1000, кГц
Обратная частота	Счеты — Счеты до пика, деленные на Длительность—Время нарастания, кГц (Частота появления счетов после пика амплитуды)
Начальная частота, IF	Счеты до пика, деленные на время нарастания, кГц
Мощность сигнала, SS	Интеграл абсолютного напряжения сигнала по времени, выраженный в пВ·с (пиковольты на секунды)
Абсолютная энергия	Временной интеграл квадрата напряжения сигнала на датчике до усиления, деленный на импеданс 10 кОм
Центральная частота, CF	Центр масс на графике спектра мощности
Пиковая частота, PF	Точка в спектре мощности, где величина пика регистрируется в результатах БПФ
Коэффициент амплитуды	Безразмерный показатель, используемый для определения, насколько экстремальны пики в форме волны
Угол подъема, UP	Время нарастания/Амплитуда

$$p(x) = \sum_{k=1}^K \pi_k N(x | \mu_k, \sigma_k), \quad (1)$$

где K — номер гибридного компонента; $N(x | \mu_k, \sigma_k)$ — ФПВ K -го компонента гибридной модели;

π_k — гибридный индекс, который выражается как $\sum_{k=1}^K \pi_k = 1$ и $0 \leq \pi_k \leq 1$, в дополнение μ_k и σ_k — это гауссовские параметры K -го компонента. Тип кластера, к которому принадлежит точка, можно определить с помощью следующих двух шагов:

1) выбрать категорию случайным образом с соответствующей вероятностью, обозначенной как π_k ;

2) выбрать точку только из этой категории распределения.

Функция правдоподобия может быть легко получена, используя ФПВ и результаты применения ГМС:

$$\ln P(x | \pi, \mu, \sigma) = \sum_{i=1}^K \ln \left\{ \sum_{k=1}^K \pi_k N(x_i | \mu_k, \sigma_k) \right\}. \quad (2)$$

Поскольку полученные данные никак не обозначены, точное количество различных точек данных не может быть определено, поэтому при решении уравнений используются неявные переменные. Для того, чтобы определить величины π_k , μ_k и σ_k , необходимо применить ОМ-алгоритм, который состоит из следующих шагов:

1) шаг О: оценки неизвестных переменных приводятся в соответствии с гипотетическими значениями. Переменная $\gamma(z_{ik})$ вводится для оценки степени зависимости данных наблюдений x_i от каждого кластера K :

$$\gamma(z_{ik}) = \frac{P(z = k, y_j | \mu, \sigma)}{\sum_{k=1}^K P(z = k, y_j | \mu, \sigma)} = \frac{\pi_k N(y_j | \mu_k, \sigma_k)}{\sum_{k=1}^K \pi_k N(y_j | \mu_k, \sigma_k)}. \quad (3)$$

2) шаг М: новый набор параметров итерации принимается на основе логарифмической функции правдоподобия максимизации параметров:

$$\mu_k = \frac{\left(\sum_{j=1}^K \gamma(z_{ik}) y_j \right)}{\left(\sum_{j=1}^K \gamma(z_{ik}) \right)}, \quad (4)$$

$$\sigma_k^2 = \frac{\left(\sum_{j=1}^K \gamma(z_{ik}) (y_j - \mu_k)^2 \right)}{\left(\sum_{j=1}^K \gamma(z_{ik}) \right)}, \quad (5)$$

$$\pi_k = \frac{\sum_{j=1}^K \gamma(z_{ik})}{K}. \quad (6)$$

Шаги О и М повторяются до тех пор, пока итерация не сходится к окончательным значениям π_k , μ_k и σ_k , которые затем подставляются в уравнения (2). Количество K компонентов в ГМС обозначает число моделей, которые соответствуют гауссову распределению. При проведении кластерного анализа важно определить количество кластеров, и выбор K напрямую влияет на эффективность кластеризации. Количество кластеров в ГМС указывает на количество содержащихся в ней гауссовых распределений. В данном исследовании оптимальное количество кластеров определяется с помощью информационного критерия Акаике (АИК) и байесовского информационного критерия (БИК). Как показано на рис. 3, выбор трех кластеров должен соответствовать особенностям наборов данных для получения оптимальных результатов кластеризации [24].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Вышеупомянутые методы отбора признаков Relief F и модель идентификации повреждений OM-GMM были использованы для идентификации повреждений композитных ламинатов с различной межфазной ориентацией волокон. Эффективность МГС в определении типа и степени повреждений была протестирована на основе экспериментальных данных и микроскопических наблюдений. Также были проанализированы характеристики параметров повреждений АЭ.

3.1. Отбор признаков и кластеризация по ГМС

Предварительно обработанные наборы данных были преобразованы с помощью метода Relief F с целью отбора признаков, отобранные признаки показаны на рис. 3. Большинство этих параметров имели гауссово распределение, однако были и исключения (например, длительность или энергия некоторых параметров имели экспоненциальное распределение). Поэтому при обработке этих параметров вместо фактического значения использовалась логарифмическая форма [25]. Данные, которые изначально были разного порядка, сравнивались после приведения к единой единице измерения с помощью процесса стандартизации Z-score. Среднее значение, стандартное отклонение и медианное значение часто выбираются в качестве порога характеристики для метода Relief F. Более того, выбор признаков для большого количества данных показывает, что среднее значение является наиболее подходящим пороговым значением при работе с набором данных с высокой или низкой размерностью [16]. Поэтому в последующем процессе отбора признаков анализировались только параметры со значениями, превышающими средневзвешенное значение. Как показано на рис. 4, амплитуда, обратная частота, центральная частота, пиковая частота, D/A, A/PF, PF/D и PF/RT могут отражать большую часть информации о сигналах АЭ.

Отбор признаков проводился по выбранным параметрам. Для визуализации данных на двумерном графике были выбраны две главные компоненты (ГК), чтобы можно было сразу определить различные кластеры. Первая ГК (ГК1) была выбрана в качестве оси X , а вторая ГК (ГК2) — в качестве оси Y . Затем была проведена ГМС-кластеризация по новым координатам.

В ГМС n -компоненты представляют собой количество моделей гауссовых распределений, из которых состоит модель, и их выбор напрямую влияет на эффективность кластеризации. Наилуч-

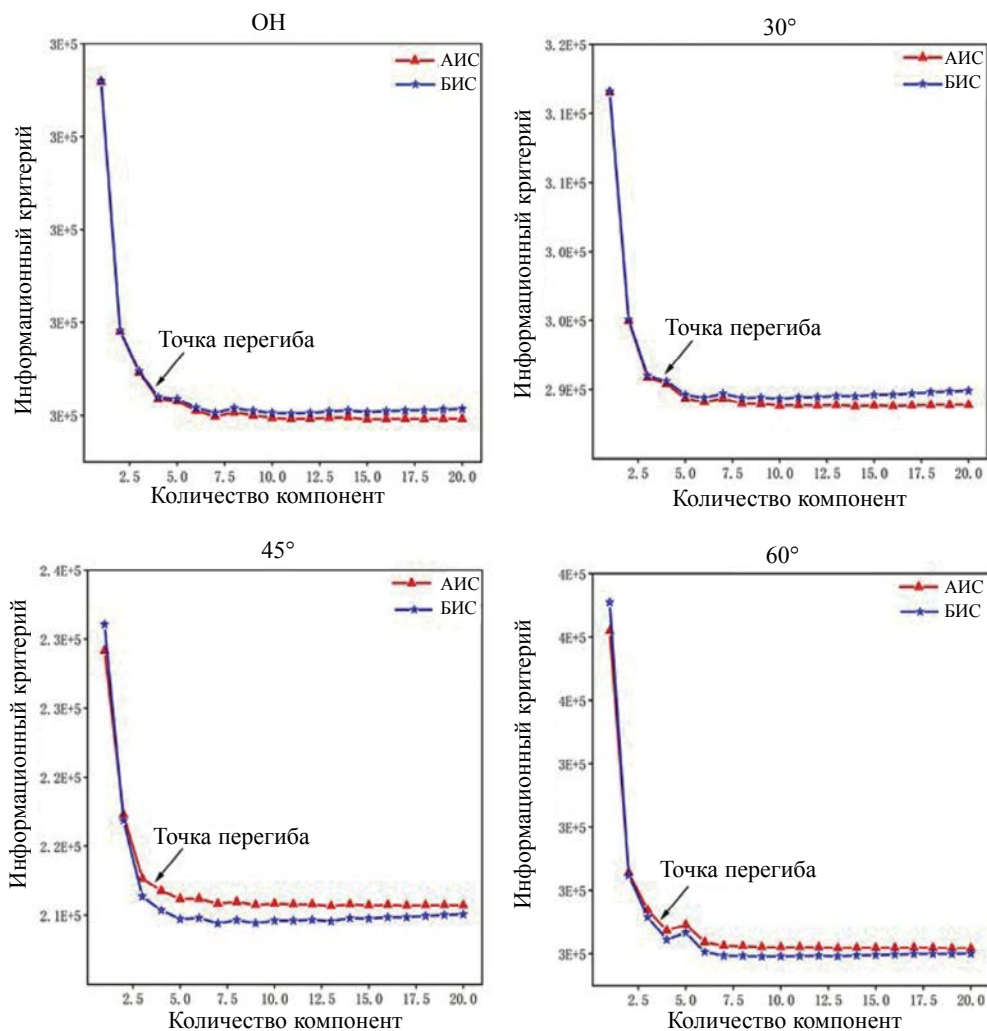


Рис. 3. Кривые АИК и БИК.

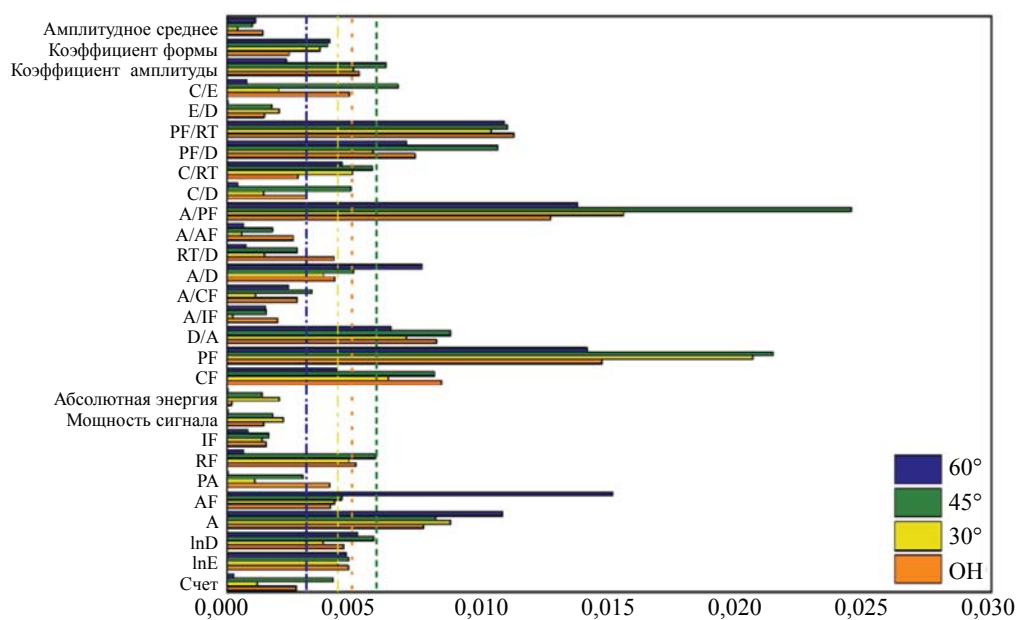


Рис. 4. Диаграмма взвешенных признаков.

шее число кластеров — это минимальное значение АИК или БИК. Кривые АИК и БИК, рассчитанные по обучающим данным процесса нанообработки, показаны на рис. 4. Из рис. 4 видно, что оптимальное решение может быть получено при выборе трех компонентов, и эти три типа как раз соответствовали трем механизмам повреждения композитных ламинатов.

Как показано на рис. 5, различные механизмы повреждения в эксперименте могут быть выражены несколькими нормальными распределениями. Если кластер был плотно распределен, то соответствующие данные были похожи друг на друга. Это указывает на то, что большинство данных для этого типа повреждений либо обладают схожими свойствами параметров, либо легко определяют диапазон значений. Кластеры со значительной концентрацией данных можно наблюдать на гауссовой диаграмме плотности для четырех типов образцов с различными углами ориентации волокон. Кроме того, распределение находилось в узком диапазоне. Следовательно, эти сигналы были связаны с разрушением матрицы. Уровень концентрации данных самый высокий на рис. 5а, что также подтверждает это предположение, поскольку для композитных ламинатов с равномерной ориентацией основная часть всего сигнала может быть приписана разрушению матрицы [18]. Формы и распределения двух других кластеров отличаются на рис. 5а—г, что может быть объяснено различиями в расслоении и разрушении волокон, вызванными различными межфазными ориентациями волокон. Наблюдения за кластерами показывают, что модели, принятые в данном исследовании, могут точно отражать механизм повреждения для всех образцов. В следующем разделе анализируются характерные параметры различных кластеров.

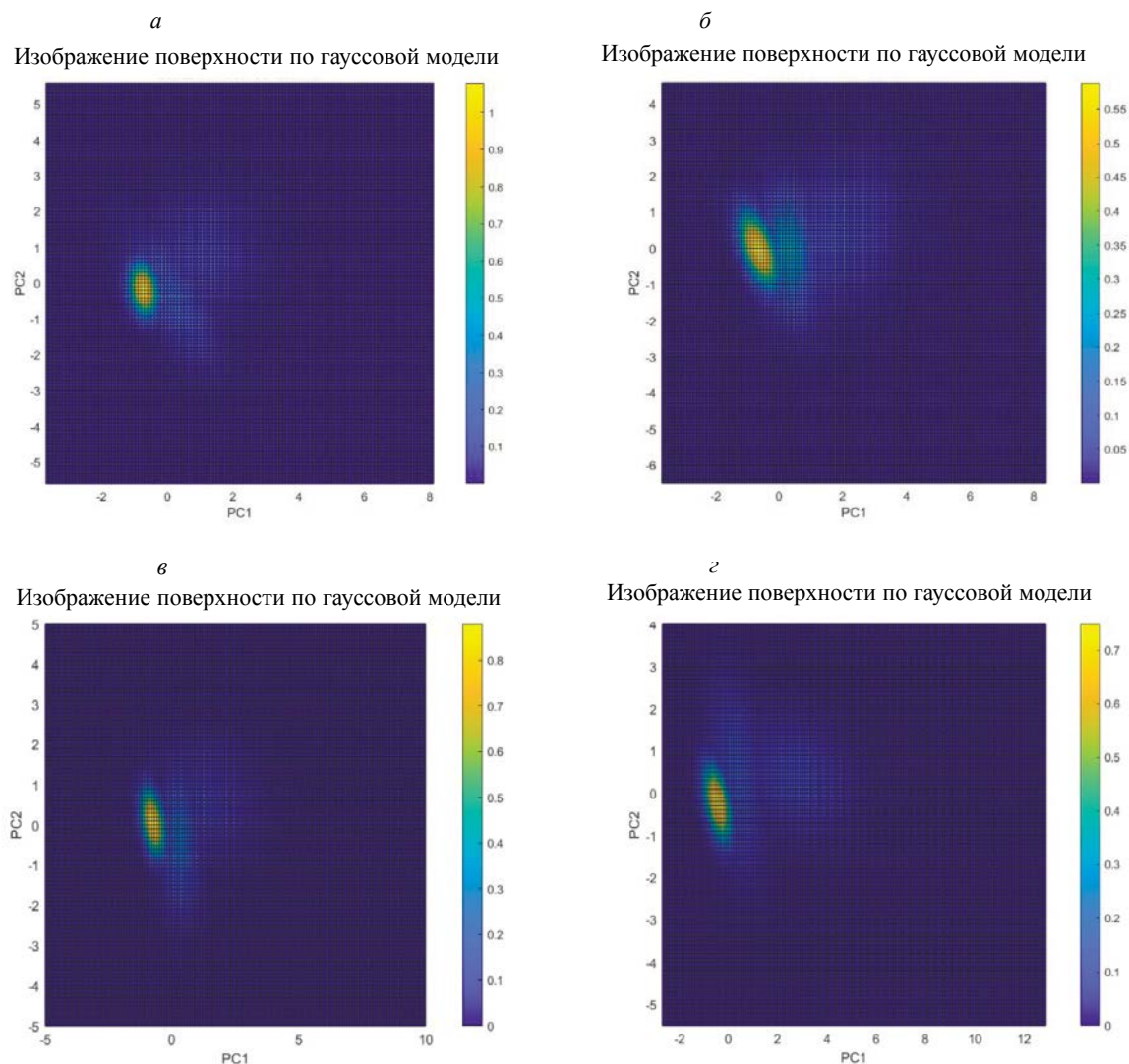


Рис. 5. ГМС, определяемая по МГК, после обучения: ОН (а); 30° (б); 45° (в); 60° (г).

3.2. Анализ результатов кластеризации

Применение данных АЭ для определения характеристик повреждений композитных материалов долгое время было спорным. Во время испытания параметры АЭ были получены из упругих волн, возникающих при внутреннем повреждении материалов, которые сначала регистрировались датчиками, а затем передавались на устройство для обработки с помощью предусилителя. Затем эти параметры были проанализированы путем кластеризации, и каждый кластер был отнесен к соответствующему механизму повреждения. Амплитуда, пиковая частота и значения УП являются типичными параметрами, используемыми в амплитудно-частотном анализе [15]. Поэтому в данном исследовании метки, полученные с помощью одного и того же алгоритма, были присвоены каждому набору данных образцов с целью установления связи между показателями АЭ и механизмом повреждения стекловолоконных ламинатов.

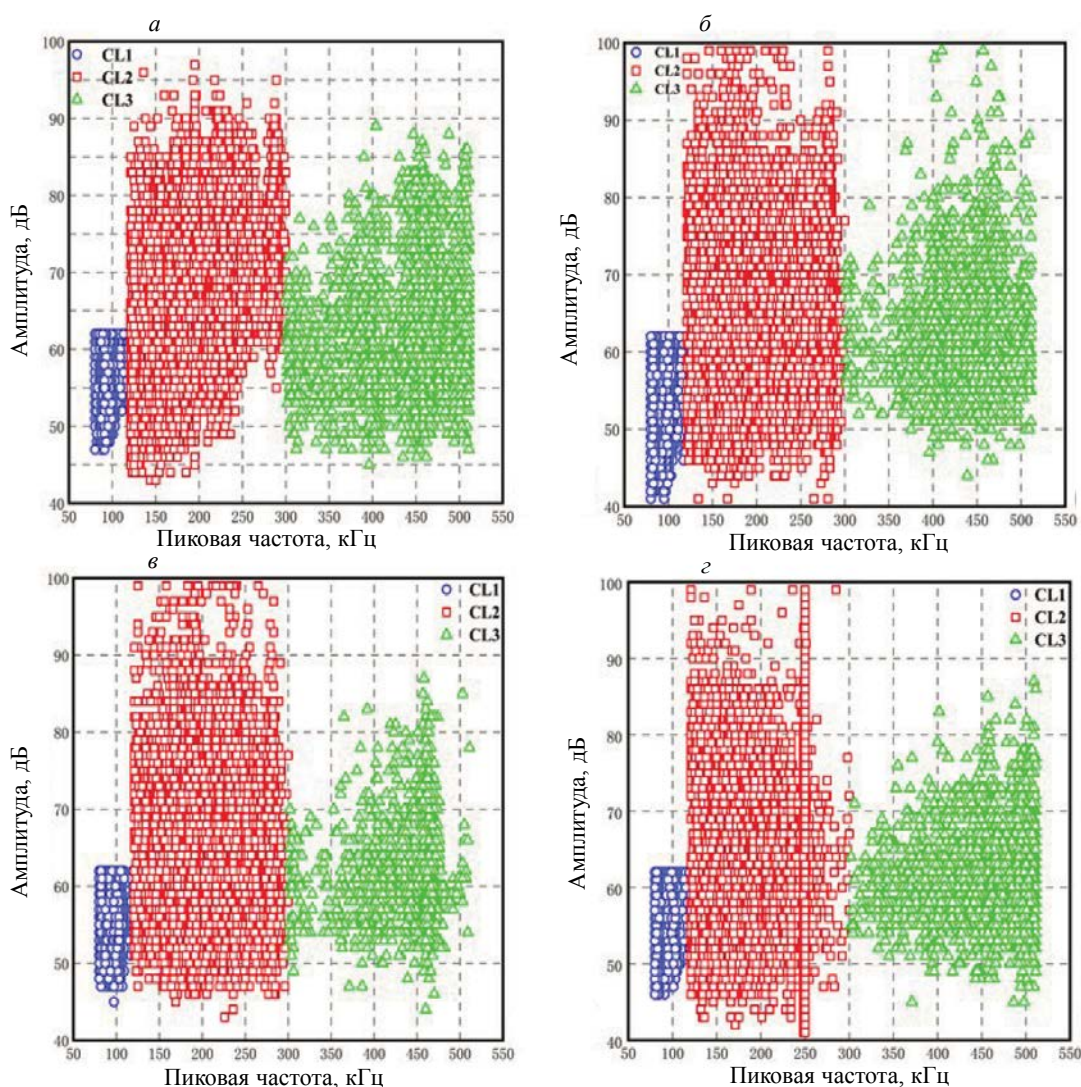


Рис. 6. Все образцы, распределенные по амплитуде и пиковой частоте: ОН (а); 30° (б); 45° (в); 60° (г).

1. Анализ кластеризации и границ кластеров

На рис. 6 показано, что различные кластеры четко отделяются друг от друга на двумерных плоскостях, и все три кластера, исследованные в данном эксперименте, имеют схожее распределение. CL1 показал низкие амплитуды и низкие пиковые частоты, CL2 показал более высокие пиковые

частоты и более широкие диапазоны, чем CL1, а CL3 показал высокие амплитуды и высокие пиковые частоты. На основании этих распределений можно отметить определенное сходство в кластеризации наборов данных композитных ламинатов с различной ориентацией межфазных волокон, хотя некоторое перекрытие данных по-прежнему остается.

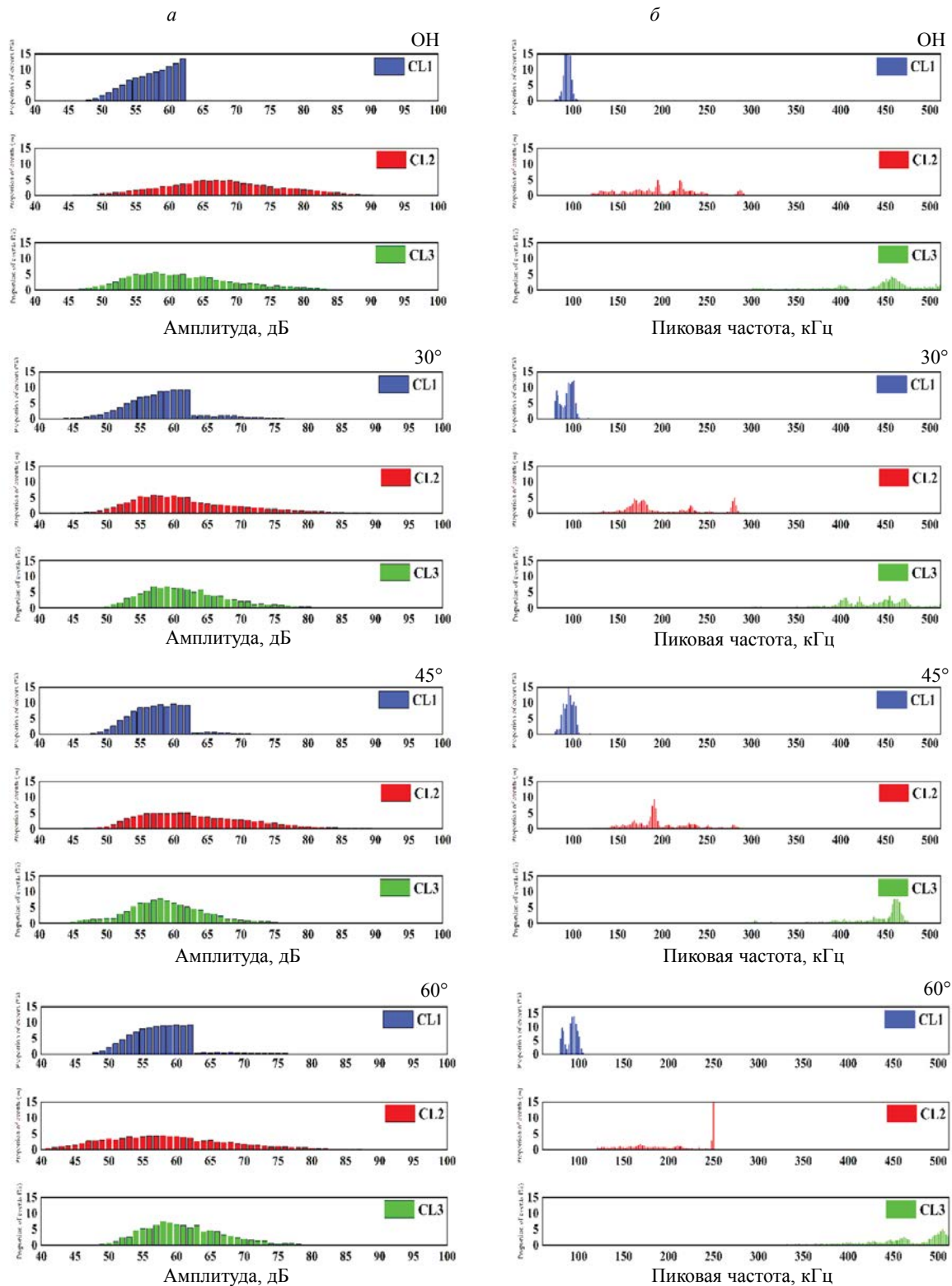


Рис. 7. Распределения амплитуды (а) и пиковой частоты (б) композитных ламинатов с различной ориентацией волокон.

Хотя распределения повреждений в определенной степени могут быть отражены в амплитуде и пиковой частоте, точное количество соответствующих событий вряд ли можно увидеть на двумерной диаграмме (диапазон распределения CL1 наименьший, но количество событий его совокупного воздействия наибольшее). Чтобы лучше различить распределение событий, соответствующих различным механизмам повреждения, были построены статистические диаграммы амплитуды и пиковой частоты для четырех различных ориентаций волокон, как показано на рис. 7.

Форма и диапазон распределений, связанных с различными образцами, схожи, как это показано на рис. 7. Диапазон амплитуды для CL1 ограничен 40—75 дБ, а для CL2 и CL3 — нормальным распределением с более широким диапазоном, чем для CL1. Диапазон для CL2 составляет 40—95 дБ, как и для CL3. Пиковая частота CL1 распределена в пределах 80—120 кГц, большинство событий CL2 расположены в пределах 150—250 кГц, а CL3 — в пределах 400—500 кГц.

Видно, что с увеличением угла ориентации волокон доля больших амплитуд увеличивается для CL1, распределение амплитуд для CL3 смещается вправо, а амплитуда у 60°-ламината намного выше, чем у ОН-ламината. Это указывает на то, что увеличение угла ориентации может дестабилизировать повреждение CL1, а часть энергии от разрушения вызывает увеличение CL1; когда происходит повреждение CL3, выделяется большее количество энергии, которое принимается датчиками. Сравнение амплитудного распределения ОН и 60°-ламината показывает, что амплитуда CL2 уменьшается с увеличением угла ориентации. Это означает, что при возникновении повреждения CL2 в 60°-ламинате высвобождается меньше энергии, чем в ОН-ламинате.

Все события CL1 происходят с постоянной скоростью в ОН-ламинате, а их частоты сосредоточены в районе 90 кГц. Частоты CL2 и CL3 также распределены в узких диапазонах, однако можно наблюдать несколько пиковых значений, что объясняется тем, что внутренние повреждения дестабилизируют повреждения CL1, генерируя сигналы удара с различными частотами. CL1 и CL3 30°-ламината имеют схожее распределение, а высокочастотная составляющая CL2 намного выше, чем у ОН-ламината. Для сравнения, в 45°-ламинате частота CL2 сосредоточена в низкой области, что указывает на то, что частота CL2 не увеличивается с углом ориентации волокон. Для 60°-ламината частота выше, чем для других образцов. Поскольку ориентация волокон в значительной степени отклоняется от расширения трещины, цикл высвобождения энергии при соединении волокон и разрушении волокон короче, что приводит к событиям, связанным с разрывом волокон.

Соответствующий механизм повреждения кластеров был проанализирован и определен, и диапазон распределения для этих кластеров обобщен в табл. 5.

Таблица 5

Границы кластеров при ДКБ-испытании ламинатов с различной ориентацией волокон

Кластеры	<i>A</i> , дБ	ПЧ, кГц
CL1	40—65	80—120
CL2	40—95	150—300
CL3	40—90	300—500

2. Эффективность модели

Для оценки эффективности идентификации повреждений ОМ-ГМС Relief F его точность сравнивалась с точностью алгоритмов *K*-средних и МНКСС. Чтобы облегчить процесс сравнения, для двух других методов кластеризации были выбраны три кластера. Наборы данных состояли из сигналов разрушения матрицы и волокна, полученных в результате испытаний на одноосное растяжение, а также сигналов расслаивания, полученных в ходе экспериментов ДКБ.

Как показано на рис. 8, эти три метода дали разные результаты кластеризации. На рис. 8а видно, что в исходных данных наблюдается перекрытие, что указывает на существование схожих сигналов по трем механизмам повреждения. Исходный набор данных может быть соответствующим образом разделен на три кластера с помощью метода *K*-средних, как показано на рис. 8б. Метод *K*-средних определил кластер, к которому принадлежала каждая точка, вычислив ее расстояние от центра, а также минимизировал расстояние от набора данных до центра кластера путем итераций. Хотя результат кластеризации казался достаточно хорошим, он был менее удовлетворительным при наличии перекрытия исходных данных. Метод МНКСС определяет геометрическую близость точек данных в евклидовом пространстве, чтобы отнести каждую точку данных к разным кластерам. Затем про-

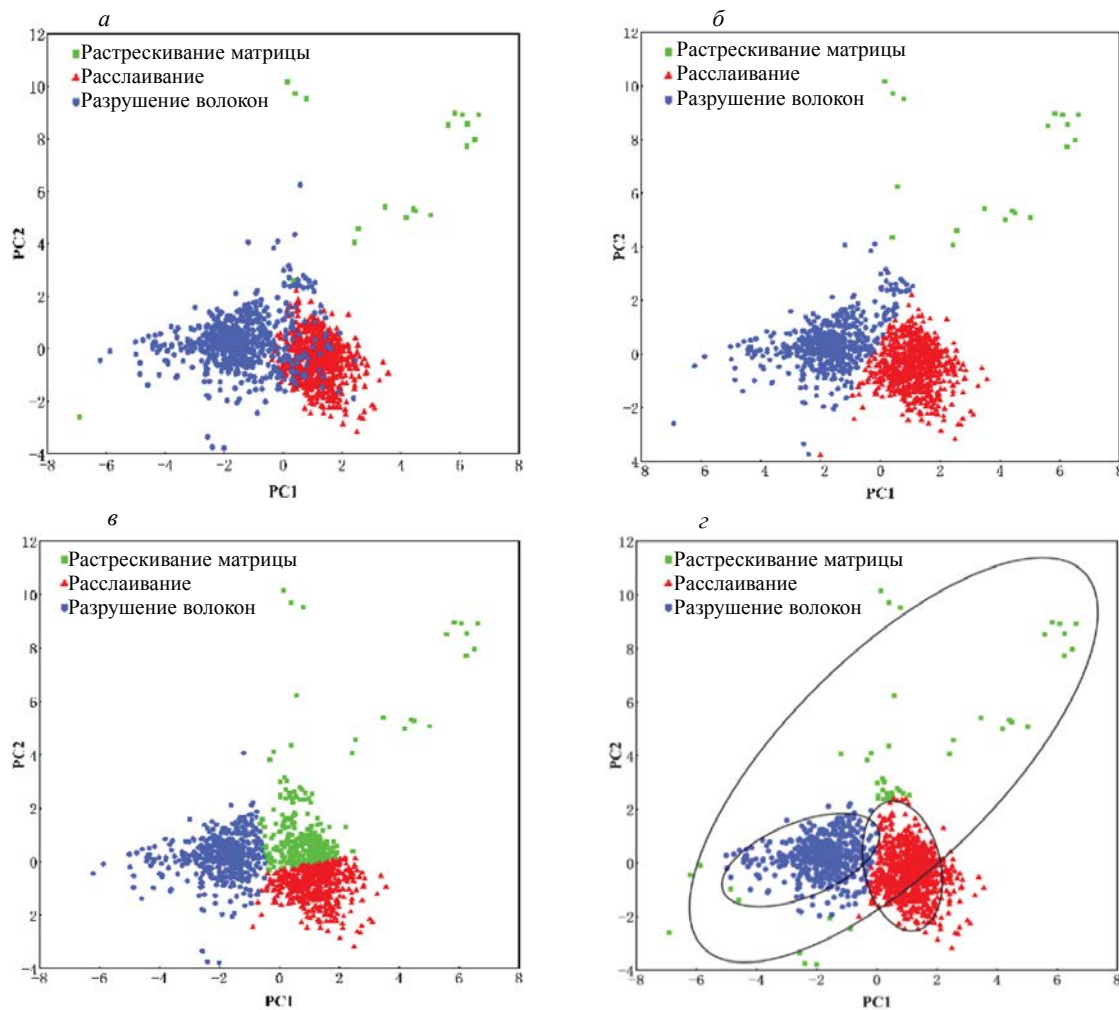


Рис. 8. Результаты кластеризации для различных методов относительно реальных данных: исходные данные (а); метод К-средних (б); МНКСС (в); ГМС (г).

Таблица 6

Влияние различных методов на эффективность идентификации

	Кол-во событий	Доля событий в каждом кластере, %			Точность, %
		CL1	CL2	CL3	
Исходные данные	1289	1,47	51,7	46,9	100
Алгоритм К-средних	1289	3,7	57,9	38,8	90,85
МНКСС	1289	25,4	37,9	36,6	71,9
МГС	1289	1,47	57,1	41,6	91,84

грамма определила расстояние между различными кластерами и, наконец, определила центр каждого кластера и степень принадлежности к каждому кластеру для каждой точки данных [26]. Рис. 8в показывает, что МНКСС также может демонстрировать хороший эффект кластеризации; однако весь набор данных был разделен поровну и, следовательно, не очень эффективен в определении различных механизмов повреждения композитных материалов. По сравнению с двумя предыдущими методами, метод OM-GMM использовал в качестве критерия вероятность вместо расстояния, как показано на рис. 8г. Наблюдалось перекрытие между различными гауссовыми распределениями, что указывает на то, что данные, перекрывающиеся в исходном наборе данных, могут быть соответствующим образом идентифицированы. Процентное соотношение событий в каждом кластере для этих трех различных моделей показано в табл. 6.

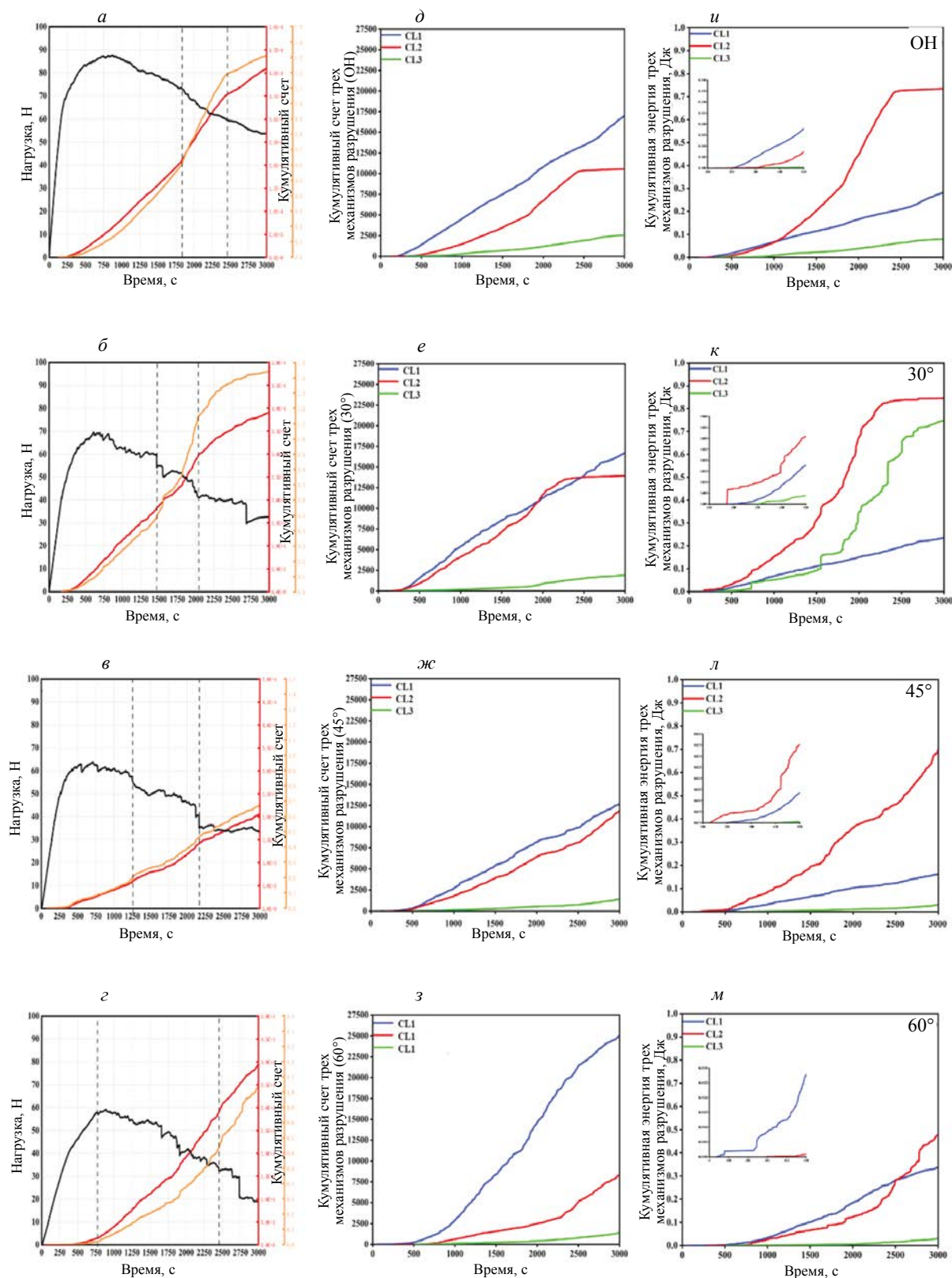


Рис. 9. Кумулятивные счета АЭ и энергии АЭ: кривые нагружения в экспериментах с ДКБ, кумулятивные счета АЭ и энергии АЭ (а—г); кумулятивные счета различных механизмов разрушения (д—з); кумулятивные энергии различных механизмов разрушения (и—м).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы установить связь между кластерами различных механизмов повреждения, были изучены диапазоны распределения параметров, относящихся к различным механизмам повреждения в ссылках [27—30]. Диапазон пиковой частоты CL1 был аналогичен диапазону, связанному с растрескиванием матрицы, как обсуждалось в [19, 29]. Аналогично, события CL2 имели амплитудный диапазон 40—95 дБ и частотный диапазон 150—300 кГц, которые были похожи на сигналы расслаивания, описанные в предыдущих исследованиях [27, 30]. Более того, все предыдущие исследования сообщили, что разрушение волокна демонстрирует большую амплитуду и высокую пиковую частоту, которые соответствуют распределению частоты CL3 [31—33].

Как показано на рис. 9а, д, и, для ОН-образца суммарное значение АЭ постоянно увеличивалось, а CL2 показало внезапное увеличение при 1750 с, сопровождаемое внезапным падением кривой нагружения. На протяжении всего эксперимента развитие трех типов повреждений было относительно стабильным и не менялось. Между тем, как показано на кривых кумулятивной энергии, события CL2 и CL1 произошли почти одновременно, что объясняется стабильным распространением разрушения в ОН-образце.

Для образца 30°, как показано на рис. 9б, е, к, кривые нагружения были неровными во многих местах с первым падением нагрузки при 1500 с, что было раньше, чем для образца ОН. Кумулятивные события и кумулятивная энергия АЭ показали, что в образце с углом 30° количество событий CL2 было больше, чем событий CL1 при 2000 с, а скорость увеличения событий CL3 увеличилась, что объясняется тем, что волокно с углом ориентации, вероятно, будет моститься или отслаиваться, и внезапное разрушение волокна может привести к внезапному расширению трещины. Это также объясняет, почему кумулятивная энергия CL3 была выше, чем CL1.

Для образца с углом 45°, как показано на рис. 9в, ж, л, наблюдались большее количество падений и более широкие области с резкими изменениями нагрузки. Первое падение нагрузки произошло при 1250 с, при этом совокупное воздействие и кумулятивная энергия были меньше, чем у других образцов. CL1 и CL2 развивались почти с одинаковой скоростью на диаграмме кумулятивных событий, что говорит о том, что волокно и матрица испытывали почти одинаковые нагрузки. В конце концов, они были удалены из ламината в виде пучков волокон, а CL3 возникал реже.

Для образца 60°, как показано на рис. 9г, з, м, кривая нагружения была самой резкой, а количество кумулятивных событий CL1 было намного больше, чем для образцов с другими углами ориентации. Ориентация пучка волокон больше отклонялась от направления расширения трещины, тем самым снижая стабильность самого образца. Кроме того, нагрузка в матрице была очень высокой, что привело к большему внутреннему повреждению. Диаграмма кумулятивной энергии CL2 имеет вид лестницы, что говорит о структурной нестабильности эксперимента.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании был проведен кластерный анализ сигналов АЭ, полученных в результате испытаний ДКБ композитных ламинатов с различной ориентацией волокон. Были получены следующие выводы:

1. Метод Relief F, используемый для отбора признаков, основан на взвешивании различных параметров по разным механизмам повреждения. Этот метод привел к резкому сокращению как объема данных, так и объема вычислений. В заключение можно сделать вывод, что амплитуда, обратная частота, центральная частота, пиковая частота, D/A, A/P, PF/D и PF/RT могут представлять большую часть информации сигнала АЭ.

2. Две ГК, полученные с помощью МГК, были включены в алгоритм ОМ-МГС для кластеризации, что не только помогло разграничить различные механизмы повреждения, но и выявило уровень концентрации различных повреждений. События АЭ были разделены на три типа, а амплитуда и пиковая частота все еще были эффективны для идентификации механизмов повреждения после того, как каждому из них был присвоен кластер. В частности, CL1 соответствовал событиям с низкой частотой и низкой амплитудой, CL2 представлял события со средней частотой и широким диапазоном амплитуд, а CL3 обозначал события с высокой частотой и высокой амплитудой. Методы кластеризации алгоритм К-средних, МНКСС и ОМ-МГС были применены к наборам данных поврежденных сигналов, и результаты показали, что МГС больше подходит для экспериментальных результатов ДКБ композитных ламинатов стекло/эпоксидная смола.

3. В соответствии с кривой нагружения четырех типов образцов был проведен дальнейший анализ кумулятивных событий АЭ и энергии АЭ. На основании литературных данных можно сделать

вывод, что события АЭ и механизм повреждения подчиняются следующим соотношениям: CL1 соответствует разрушению матрицы, CL2 соответствует расслоению, а CL3 соответствует разрушению волокон.

Наборы данных, созданные и/или проанализированные в ходе настоящего исследования, доступны у ответственного автора по обоснованному запросу. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Данная работа поддержана Фондом Естественных Наук Провинции Хэйлунцзян (номер гранта LH2022E029) и Проектом Фонда постдокторантуры Провинции Хэйлунцзян (номер гранта LBH-Q21083).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhou W., Zhao W.Z., Zhang Y.N., Ding Z.J. Cluster analysis of acoustic emission signals and deformation measurement for delaminated glass fiber epoxy composites // *Compos. Struct.* 2018. V. 195. P. 349—358.
2. Mohammadi R., Najafabadi M.A., Saeedifar M., Yousefi J., Minak G. Correlation of acoustic emission with finite element predicted damages in open-hole tensile laminated composites // *Composites. Part B: Eng.* 2017. V. 108. P. 427—435.
3. Lorriot T., Marion G., Harry R., Wargnier H. Onset of free-edge delamination in composite laminates under tensile loading // *Composites. Part B: Eng.* 2003. V. 34 (5). P. 459—471.
4. Saeedifar M., Najafabadi M.A., Zarouchas D., Toudeshky H.H., Jalalvand M. Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission // *Composites, Part B: Eng.* 2018. V. 144. P. 206—219.
5. Yu F., Okabe Y., Wu Q., Shigeta N. A novel method of identifying damage types in carbon fiber-reinforced plastic cross-ply laminates based on acoustic emission detection using a fiber-optic sensor // *Compos. Sci. Technol.* 2016. V. 135. P. 116—122.
6. Arumugam V., Kumar C.S., Santulli C., Sarasini F., Stanley A.J. A global method for the identification of failure modes in fiberglass using acoustic emission // *J. Test. Eval.* 2011. V. 39 (5). P. 954—966.
7. Fotouhi M., Sadeghi S., Jalalvand M., Ahmadi M. Analysis of the damage mechanisms in mixed-mode delamination of laminated composites using acoustic emission data clustering // *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 2017. V. 30 (3). P. 318—340.
8. Li L., Lomov S.V., Yan X., Carvelli V. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites // *Compos. Struct.* 2014. V. 116. P. 286—299.
9. Li C.J., Li S.Y. Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring // *Wear.* 1995. V. 185 (1—2). P. 67—74.
10. Dunegan H.L., Harris D.O., Tatro C.A. Fracture analysis by use of acoustic emission // *Eng. Fract. Mech.* 1968. V. 1 (1). P. 105—122.
11. Van Tittelboom K., De Belie N., Lehmann F., Grosse C.U. Acoustic emission analysis for the quantification of autonomous crack healing in concrete // *Constr. Build. Mater.* 2012. V. 28 (1). P. 333—341.
12. Kishawy H.A., Hegab H., Umer U., Mohany A. Application of acoustic emissions in machining processes: analysis and critical review // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018. V. 98 (5). P. 1391—1407.
13. Ely T.M., Hill E. Longitudinal splitting and fiber breakage characterization in graphite epoxy using acoustic emission data // *Mater. Eval.* 1995. V. 53 (2). P. 288—294.
14. Barnes C.A., Ramirez G. Acoustic emission testing of carbon fiber composite offshore drilling risers / AECM-6: Sixth International Symposium on Acoustic Emission From Composite Materials. 1998. P. 13—22. American Society for Nondestructive Testing, Inc, San Antonio.
15. Barile C., Casavola C., Pappaletta G., Kannan V.P. Laplacian score and K-means data clustering for damage characterization of adhesively bonded CFRP composites by means of acoustic emission technique // *Applied Acoustics.* 2022. V. 185. P. 108425.
16. Jain D., Singh V. An efficient hybrid feature selection model for dimensionality reduction // *Procedia Comput. Sci.* 2018. V. 132. P. 333—341.
17. American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for Tensile Properties of Glass Fiber Strands, Yarns, and Rovings Used in Reinforced Plastics. ASTM International, ASTM International, 2009.
18. Nikbakht M., Yousefi J., Hosseini-Toudeshky H., Minak G. Delamination evaluation of composite laminates with different interface fiber orientations using acoustic emission features and micro visualization // *Composites. Part B: Eng.* 2017. V. 113. P. 185—196.
19. American Society for Testing and Materials: Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. ASTM International. 2021.
20. Kononenko I. Estimating attributes.: Analysis and extensions of RELIEF. In: Bergadano, F., De Raedt, L.(eds.) European Conference on Machine Learning. P. 171—182. Springer, Berlin, Heidelberg, 1994.

21. *Ichenihi A., Li W., Gao Y., Rao Y.* Feature selection and clustering of damage for pseudo-ductile unidirectional carbon/glass hybrid composite using acoustic emission // *Applied Acoustics*. 2021. V. 182. P. 108184.
22. *Saeedifar M., Zarouchas D.* Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: A review // *Composites. Part B: Engineering*. 2020. V. 195. P. 108039.
23. *Cheng F., Zhai S.C., Dong J.* Investigation of Gaussian mixture clustering model for online diagnosis of tip-wear in nanomachining // *J. Manuf. Processes*. 2022. V. 77. P. 114—124.
24. *Seyfi S.M.S., Sharifi A., Arian H.* Portfolio Value-at-Risk and expected-shortfall using an efficient simulation approach based on Gaussian Mixture Model // *Math. Comput. Simul.* 2021. V. 190. P. 1056—1079.
25. *Moevus M., Godin N., R'Mili M., Rouby D., Reynaud P., Fantozzi G.* et al. Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiCf/[Si-B-C] composites exhibiting different tensile behaviours. Part II: Unsupervised acoustic emission data clustering // *Compos. Sci. Technol.* 2008. V. 68 (6). P. 1258—1265.
26. *Dunn J.C.* A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters // *J. Cybern.* 1973. V. 3 (3). P. 32—57.
27. *Ramirez-Jimenez C.R., Papadakis N., Reynolds N., Gan T.H., Purnell P., Pharaoh M.* Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event // *Compos. Sci. Technol.* 2004. V. 64 (12). P. 1819—1827.
28. *Kotsikos G., Evans J.T., Gibson A.G., Hale J.* Use of acoustic emission to characterize corrosion fatigue damage accumulation in glass fiber reinforced polyester laminates // *Polym. Compos.* 1999. V. 20 (5). P. 689—696.
29. *Godin N., Huguet S., Gaertner R.* Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites // *NDT E Int.* 2005. V. 38 (4). P. 299—309.
30. *Fotouhi M., Najafabadi M.A.* Acoustic emission-based study to characterize the initiation of delamination in composite materials // *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 2016. V. 29 (4). P. 519—537.
31. *Gutkin R., Green C.J., Vangrattanachai S., Pinho S.T., Robinson P., Curtis P.T.* On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses // *Mech. Syst. Sig. Process.* 2011. V. 25 (4). P. 1393—1407.
32. *Komai K., Minoshima K., Shibutani T.* Investigations of the fracture mechanism of carbon/epoxy composites by AE signal analyses // *JSME International Journal. Ser. 1. Solid mechanics, strength of materials*. 1991. V. 34 (3). P. 381—388.
33. *Jong H.J.* Transverse cracking in a cross-ply composite laminate-detection in acoustic emission and source characterization // *J. Compos. Mater.* 2006. V. 40 (1). P. 37—69.

ВИХРЕТОКОВЫЙ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТОВ ОХРУПЧИВАНИЯ ПРИ 475 °С В ДУПЛЕКСНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЯХ И ПАРАМЕТРОВ КОРРОЗИИ

© 2023 г. Р. Гис^{1,*}, А. Хаммуда², А. Зиуше², Н. Бушеру², А. Шуша¹,
Р. Халими², А. Бенмуссат¹

¹Лаборатория материаловедения и энергетики, Научно-технологический институт, Университетский центр Таманрассета, Таманрассет, 11034 Алжир

²Исследовательский центр промышленных технологий (ИЦПТ), п/я 64, Шерага 16014 Алжир
E-mail: *rimghis21@gmail.com

Поступила в редакцию 21.09.2022; после доработки 25.01.2023

Принята к публикации 10.02.2023

Проведено исследование эффекта охрупчивания в дуплексной нержавеющей стали DSS 2205, выдержанной от 5 до 100 ч при температуре 475 °С, с помощью вихретокового и ультразвукового методов. Кроме того, проведено исследование коррозионного поведения после термообработки при 475 °С. Экспериментальные результаты показывают, что наблюдалось обратное поведение между нормированным импедансом и твердостью в процессе старения при 475 °С; когда нормированный импеданс вихретокового зонда уменьшался, твердость увеличивалась с увеличением времени старения. В работе для каждого образца были рассчитаны скорость продольной ультразвуковой волны и скорость поперечной волны. Модуль Юнга и модуль сдвига были рассчитаны на основе этих двух скоростей. Проведенное исследование показывает чувствительность вихретокового и ультразвукового методов к изменению микроструктуры, наблюдаемому при 475 °С, вследствие охрупчивания в дуплексной нержавеющей стали. Влияние термообработки при 475 °С на коррозионное поведение также оценивалось с использованием метода вихревых токов в течение длительного времени и показало значительное изменение коррозионной стойкости вследствие спинодального распада ферритной фазы.

Ключевые слова: охрупчивание при 475 °С, дуплексная нержавеющая сталь, вихревые токи, ультразвук, коррозия.

DOI: 10.31857/S013030822303003X, **EDN:** OOXVXX

1. ВВЕДЕНИЕ

Дуплексные нержавеющие стали (ДНС) очень широко используются в различных областях, таких как нефтехимическая, морская и химическая, поскольку ДНС обладают очень хорошими механическими свойствами и коррозионной стойкостью [1—4]. Широкое применение ДНС обусловлено их микроструктурой, состоящей из двух фаз: феррита и аустенита. ДНС подвержены явлению охрупчивания, если они подвергаются воздействию температуры свыше 280 и до 500 °С [5], причем наибольшее охрупчивание наблюдалось при температуре 475 °С по данным Reidrich и др. [6].

Охрупчивание при 475 °С объясняется спинодальным распадом ферритной фазы, образованием α' -фазы, обогащенной Fe, и α'' -фазы, обогащенной Cr, хотя могут образовываться и зародыши других фаз, таких как G- и R-фазы, в присутствии которых также могут изменять механические свойства [7—9].

В литературе имеется много работ, посвященных изучению электромагнитных свойств термического охрупчивания в дуплексных нержавеющих сталях при температуре 475 °С. Tsuchiya и др. [10] и Evanson и др. [11] использовали магнитные методы измерений и показали, что в ДНС потери на гистерезис, остаточная индукция и коэрцитивная сила увеличиваются с продолжительностью времени старения.

С другой стороны, Maeda и др. [12] экспериментально установили, что в процессе старения дуплексной нержавеющей стали происходит снижение коэрцитивной силы. Guitérrez-Vargas и др. [13] исследовали охрупчивание при 475 °С супердуплексных нержавеющих сталей (СДНС) с помощью датчика падения потенциала переменного тока (ПППТ). Они обнаружили, что с увеличением времени старения электропроводность увеличивается. Та же исследовательская группа изучила возможность использования термоэлектрической энергии (ТЭП) для наблюдения за охрупчиванием при температуре 475 °С в результате выпадения осадка α' -фазы в образцах СДНС при различных временах старения. Они пришли к выводу, что метод ТЭП чувствителен к образованию выпадений α' -фазы [14].

Методы неразрушающей оценки надежности (NDE) используются для изучения различных типов повреждений в металлических материалах. В последние годы для исследования охрупчива-

ния дуплексных нержавеющих сталей при высоких температурах $>700^{\circ}\text{C}$ использовали метод вихревых токов как недорогой и быстрый метод [15—17], ультразвуковой метод также используется для изучения фазовых превращений в ДНС. Araújo Freitas и его коллеги [18] исследовали и определили параметры процесса охрупчивания при температуре 475°C в ДНС марки DSS 2205 с помощью ультразвукового метода. В результате они обнаружили, что параметры ультразвука (продольная скорость, поперечная скорость, затухание ультразвука и другие механические характеристики) чувствительны к микроструктурным изменениям в материале, вызванным различным временем старения, что позволяет идентифицировать превращение α -фазы в α' -фазу.

Целью данной работы является исследование низкотемпературного охрупчивания для различных периодов старения с помощью вихретокового и ультразвукового методов. Также оценивается микроструктура, твердость и коррозионные свойства охрупчивания при температуре 475°C .

2. МАТЕРИАЛ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В данной работе использовали дуплексную нержавеющую сталь 2205 (22Cr и 5Ni) толщиной 3 мм из стандартного трубопровода, химический состав которой приведен в табл. 1. Образцы вырезались в виде прямоугольника размером 3×3 см.

Химический состав дуплексной нержавеющей стали

Таблица 1

Хим. элемент	C	Si	V	Mn	Fe	Cu	Al	P	S	Cr	Ni	Mo	W
%	0,02	0,46	0,09	1,73	64,04	0,29	0,25	0,10	0,11	22,95	5,53	2,93	0,05

В процессе термической обработки семь образцов были отожжены при 1100°C в течение 1 ч с последующей закалкой в воде, чтобы удалить все виды выпадений в ферритной фазе. Остальные образцы обрабатывались при температуре 475°C в течение 5, 8, 25, 50, 75 и 100 ч с последующей закалкой в воде.

Для того чтобы оценить влияние охрупчивания при температуре 475°C на микроструктуру, образцы при подготовке для микроструктурных исследований подвергались механической полировке и травлению в растворе глицерина. С помощью оптического микроскопа Nikon, оснащенного цифровой камерой и компьютерной программой, была получена микроструктура DSS 2205, как показано на рис. 2.

Для наблюдения особенностей поверхности образцы были помещены в растровый электронный микроскоп (РЭМ) JEOL JSM-7610F, работающий при напряжении 15 кВ. Для анализа химического состава различных фаз использовался РЭМ, оснащенный системой EDS. Состаренные образцы были подготовлены путем электролитического травления в щавелевой кислоте в течение 20 с, при температуре окружающей среды и потенциале травления 3 В.

Для определения твердости испытания проводили с помощью индентора Виккерса (HV10) со средним значением вдавливания, равным 5. Пять вдавливания на образец были сделаны на пяти различных зернах каждой фазовой области. Для исследования вихревых токов был использован анализатор импеданса Agilent 4284A в качестве системы для подачи сигнала на датчик для генерации вихревых токов в образце на различных частотах и в качестве системы измерения изменения импеданса датчика в отсутствие и в присутствии образцов. Когда вблизи датчика нет объекта контроля, его импеданс определяется следующим уравнением:

$$Z_0 = R_0 + jX_0,$$

где R_0 и X_0 — соответственно активное сопротивление (действительная часть Z_0) и реактивное сопротивление (мнимая часть Z_0) и $X_0 = 2\pi fL_0$ пропорционально частоте f и индуктивности L_0 . Когда датчик располагается близко к изделию из нержавеющей стали, импеданс датчика Z_i изменяется. Действительная и мнимая части Z_i принимают значения R_n и X_n , что приводит к новому значению Z_n , что и показано на рис. 1 для отожженного образца ДНС. По уравнению ниже определяется новое значение импеданса:

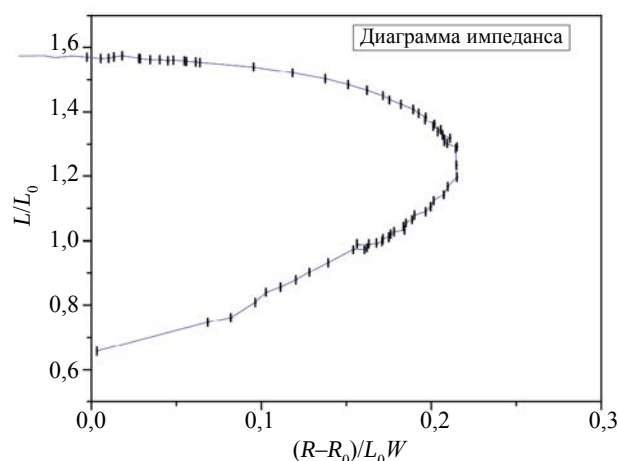


Рис. 1. Диаграмма импеданса датчика исходного образца из стали DSS 2205.

$$Z_n = \frac{(R_i - R_0)}{X_0} + j \frac{X_i}{X_0}.$$

Для получения хорошего отклика и хорошей чувствительности в дуплексных нержавеющих сталях были реализованы и оптимизированы специальные датчики. Чтобы избежать краевого эффекта, датчик делают малого диаметра с большим числом витков для увеличения величины магнитного поля, а затем и отклика на вихревые токи. Чтобы уменьшить влияние зазора, катушка была изготовлена малой высоты, для того чтобы многослойные витки располагались как можно ближе к поверхности образца. Частотные измерения были оптимизированы путем построения диаграммы импеданса зонда в присутствии дуплексных нержавеющих сталей

Ультразвуковые сигналы были получены при прямом контакте ультразвуковых преобразователей типа (OLYMPUS) диаметром 15 мм и с частотой 5 МГц с образцом. Для формирования качественного акустического контакта использовали гель-смазку для УЗК. Визуализацию ультразвукового сигнала осуществлялась на цифровом осциллографе Gw1NSTEK GDS-2102, сопряженном с компьютером для сбора данных сигнала и последующей обработки. Для каждого образца были измерены две скорости ультразвука (продольная скорость V_L и поперечная скорость V_T) путем измерения времени между двумя последовательными эхосигналами; скорость определялась по следующему уравнению:

$$v = \frac{2e}{\tau},$$

где e — толщина образца; τ — время между двумя последовательными эхосигналами.

Электрохимические испытания проводили в электрохимической ячейке с тремя электродами в растворе хлоридной среды 1 моль/л HCl. Перед испытаниями образцы погружали в раствор на три дня; измерения электрохимической поляризации осуществляли при скорости сканирования до достижения потенциала разомкнутой цепи. Были измерены потенциал коррозии (E_{corr}) и ток коррозии (I_{corr}). Те же образцы были отполированы и снова погружены в 1 моль/л раствор HCl на 100 дней для оценки коррозионных свойств с помощью вихревых токов. В течение этого периода нормированный импеданс измеряли для каждого образца несколько раз.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Влияние времени старения на микроструктуру ДНС

На рис. 2 показаны оптические микрофотографии образцов, отожженных (в исходном состоянии обработанных раствором при 1100 °С в течение 1 ч) и обработанных при 475 °С (8, 25, 50, 75 и 100 ч). Наблюдается типичная микроструктура стали DSS, состоящая из удлиненных зерен

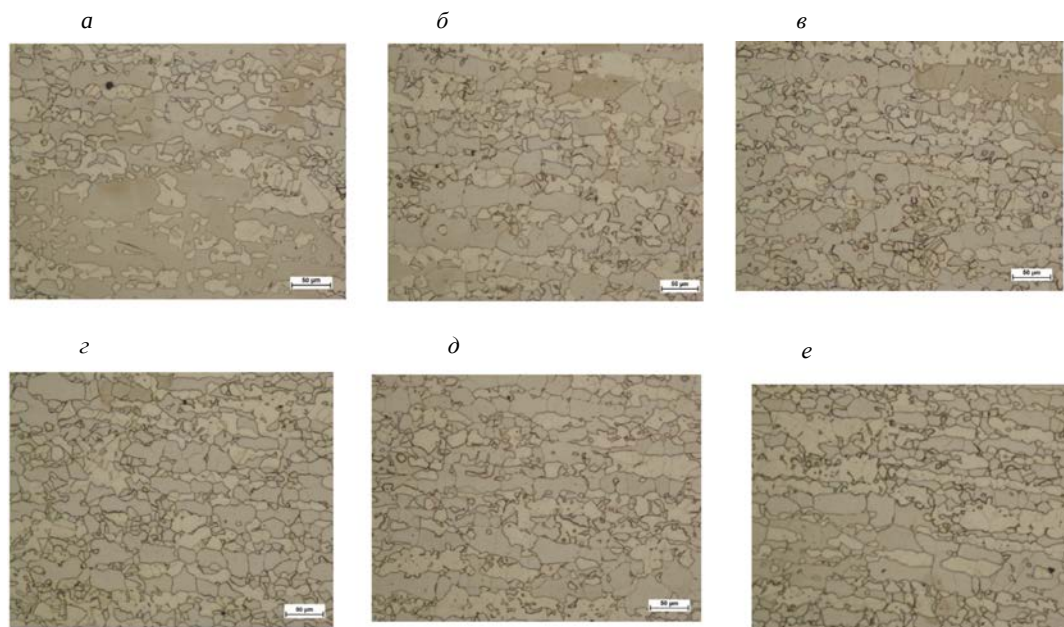


Рис. 2. Микроструктура стали DSS 2205, обработанная при 475 °С с различными временами старения: 0 (а), 8 (б), 25 (в), 50 (г), 75 (д) и 100 ч (е).

аустенита (светлая фаза) в ферритной матрице (темная фаза), причем обе фазы имеют почти равную объемную долю, измеренную количественными методами.

Микроскопические изображения, полученные с помощью оптического микроскопа, не показывают ощутимых изменений между образцом, обработанным раствором, и образцами, обработанными при низкой температуре, поскольку размер α' -фазы составляет порядок нанометров, и она не обнаруживается при данном типе термообработки. Поэтому для выявления выпадений или вторичных фаз предпочтительнее использовать СЭМ-изображения. Показанные на рис. 3а—г микрофотографии с СЭМ демонстрируют наличие вторичных фаз в ферритной матрице у образцов,

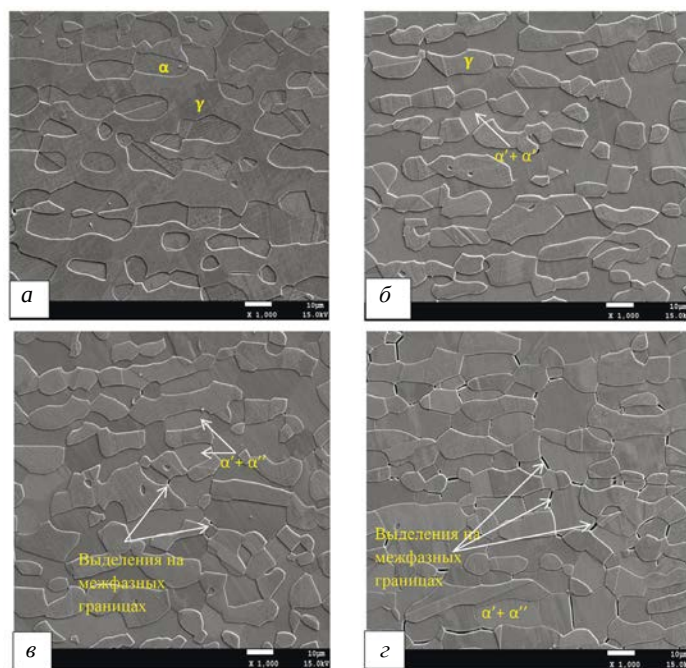


Рис. 3. СЭМ-изображения стали DSS 2205 для образцов в исходном состоянии (а) и состаренных при 475 °С в течение 50 ч (б); 75 ч (в); 100 ч (г).

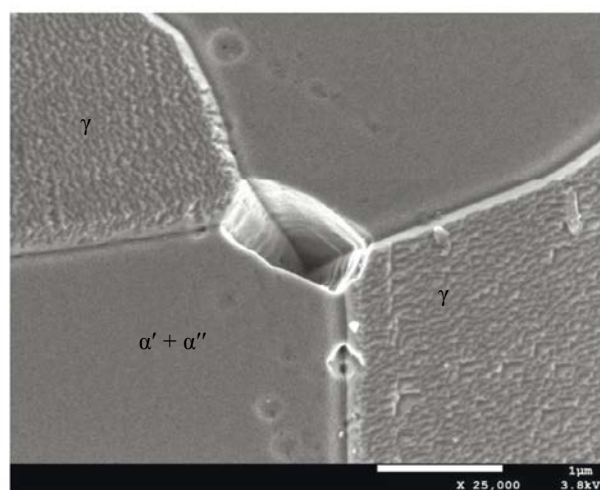


Рис. 4. Спинодальный распад на участке феррита в образце, подверженного старению в течение 100 ч при 475 °С.

обработанных при температуре 475 °С, в сравнении с исходными образцами. После процедуры старения в течение 50 ч, как показано на рис. 3б, наблюдается спинодальный распад и проявляется образование обогащенной Fe α' -фазы и обогащенной Cr α'' -фазы в ферритовых областях. Явление наиболее четко наблюдается в образце, подвергнутому старению в течение 100 ч. В зоне аустенита не наблюдалось выделений при изменении размера и формы зерен обеих фаз. Однако выделения в границах между фазами начинают появляться после 75 ч выдержки, при этом зерна становятся более мелкими. Наличие выделений в межфазных границах становится более выраженным после 100 ч старения. Это наблюдение согласуется с работой Redjaimai и др. [19].

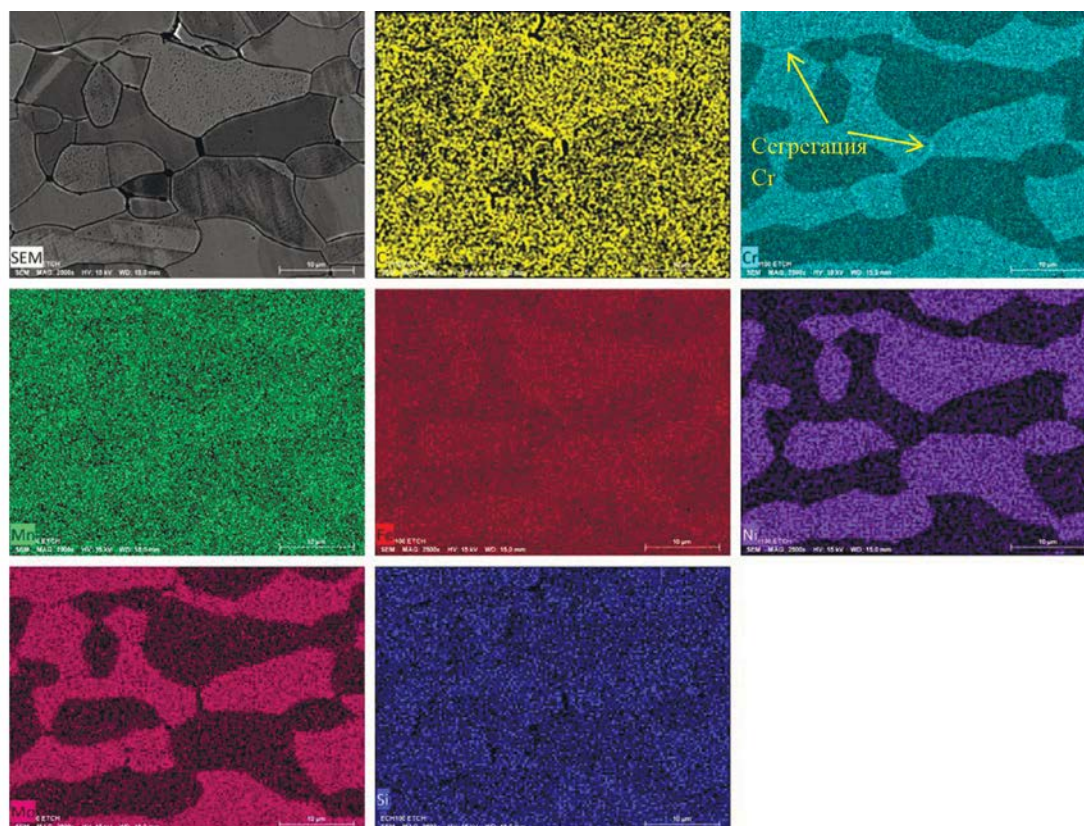


Рис. 5. Химический состав стали DSS 2205, выдержанной при 457 °С в течение 100 ч.

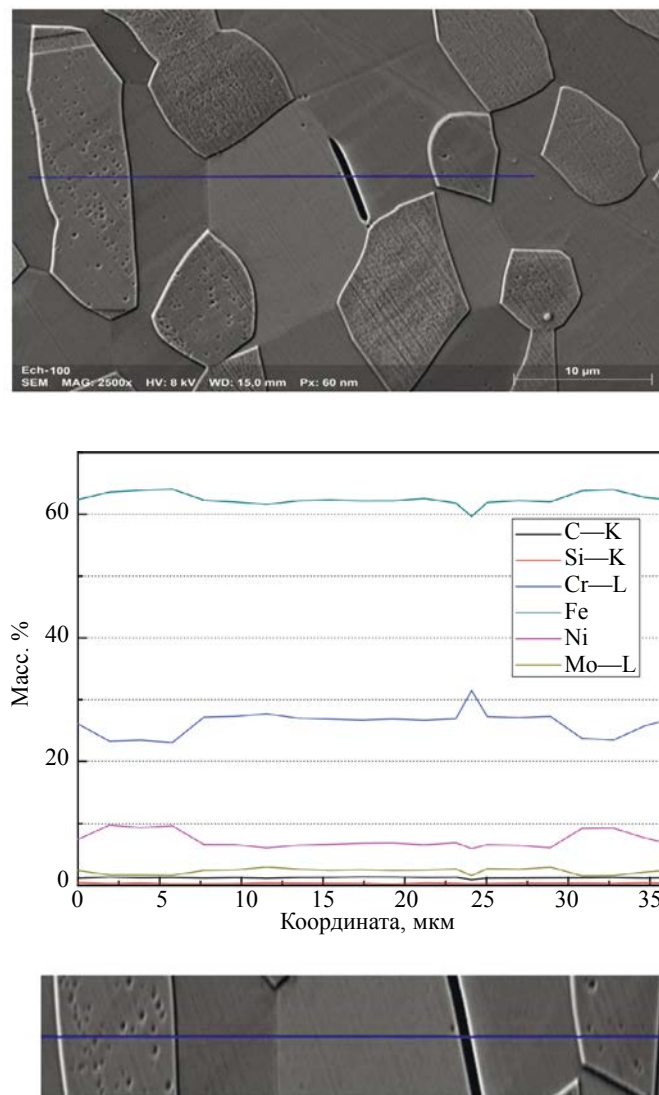


Рис. 6. Профиль химического состава в образце, состаренного в течение 100 ч при температуре 475 °С.

Химический анализ образца, выдержанного в течение 100 ч (рис. 5), показывает, что в ферритной фазе α' -фаза, обогащенная Cr, обеднена Fe и Ni. Также наблюдается значительная концентрация (химическая сегрегация) Cr в некоторых межфазных границах. Эти результаты согласуются с работой Огбек и др. [20].

Рис. 6 иллюстрирует данные по химическому составу ферритной и аустенитной фаз образца, выдержанного в течение 100 ч. Cr и Fe являются самыми многочисленными химическими элементами в ферритной области, однако их концентрации варьируются, что означает наличие вторичных фаз в ферритной области. Большая часть профиля Cr имеет место на межфазных границах, в то время как количество Fe уменьшается, что может быть объяснено сегрегацией Cr и обеднением Fe в материале, вызванными спинодальным распадом.

Такие результаты получили подтверждение в литературе, где показано, что микроструктурные изменения в ДНС при температуре 475 °С появляются со временем старения [21], а α' -фаза обнаруживается с помощью методов, обладающих высоким разрешением. Эти методы применяются только в некоторых лабораториях из-за дорогостоящего оборудования и трудностей с подготовкой образцов. Поэтому, чтобы избежать вышеупомянутых трудностей, используются косвенные методы оценки, такие как твердость и неразрушающие методы.

3.2. Влияние охрупчивания при 475 °С на твердость

Изменение значений твердости по Виккерсу в зависимости от времени старения при температуре 475 °С представлено на рис. 7. Твердость увеличивается на 60 HV при времени старения 5 ч, затем изменение медленно увеличивается со временем старения до 350 HV при старении в течение 75 ч. Очень незначительное снижение твердости наблюдается также при 100 ч. Эти изменения обусловлены выделением α' -фазы или влиянием других фаз.

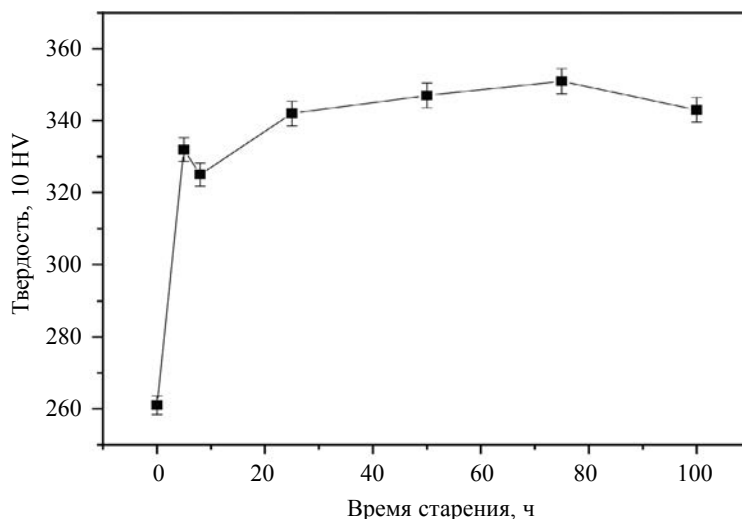


Рис. 7. Зависимость твердости от времени старения при 475°С.

3.3. Диагностика вихретоковыми методами

На рис. 8 показано изменение импеданса вихретокового датчика, измеренного для каждого образца и времени старения. Нормированный импеданс вихретокового датчика, соответствующий отношению Z/Z_0 (импеданс вихретокового датчика при контакте с материалом Z , деленный на импеданс в отсутствие материала (Z_0)), уменьшается при увеличении продолжительности термообработки при 475 °С, что связано с изменением магнитных и электрических свойств ДНС.

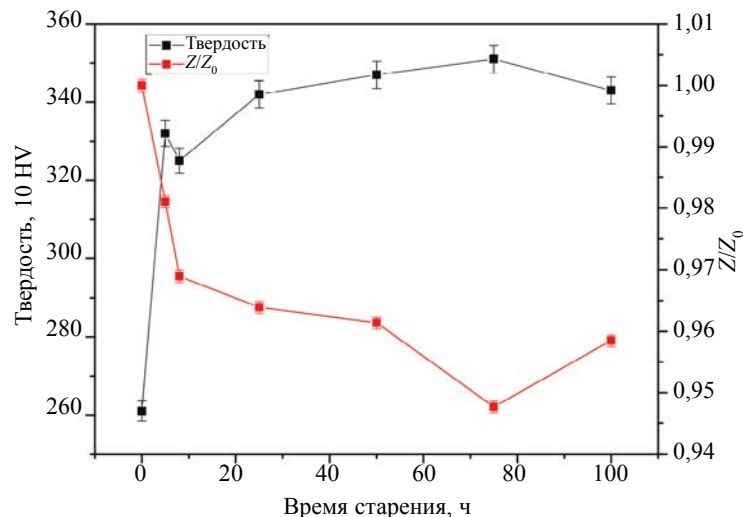


Рис. 8. Влияние времени термообработки при 475°С на нормированный импеданс (Z/Z_0) и на твердость.

Нормированный импеданс зонда при различном времени старения был сопоставлен с твердостью образцов. Наблюдали обратное поведение, при увеличении времени старения нормированный импеданс уменьшается, в то время как твердость увеличивается. Существование связи между нормированным импедансом и твердостью было изучено ранее и подтверждено Zergoug и др. [22].

Нормированный импеданс изменяется вследствие уменьшения магнитной проницаемости и увеличения проводимости со временем старения [14, 17, 23]. Незначительное увеличение отношения Z/Z_0 наблюдается после 75 ч старения в результате появления структурных изменений и выделений на межфазных границах, как видно из результатов СЭМ-анализа. При старении ферритная фаза распадается на фазу, обогащенную Fe, и фазу, обогащенную Сг, которая является немагнитной, в результате чего ферромагнитные участки уменьшаются, согласно Tavares и др. [23].

Данный результат подтверждает, что чувствительность метода вихревых токов к изменению микроструктуры и твердости при температуре 475 °С в течение длительного времени выдержки имеет обратную зависимость.

3.4. Результаты ультразвукового контроля

Измерения скорости ультразвука продольных и поперечных волн в образцах, состаренных при температуре 475 °С в течение 0—100 ч, показаны на рис. 9 и 10. Зависимости показывают, что

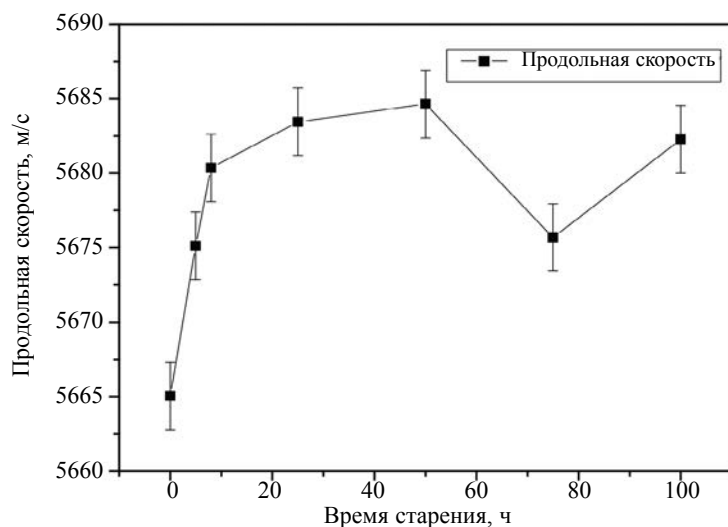


Рис. 9. Влияние времени старения на скорость продольной волны при температуре 475 °С.

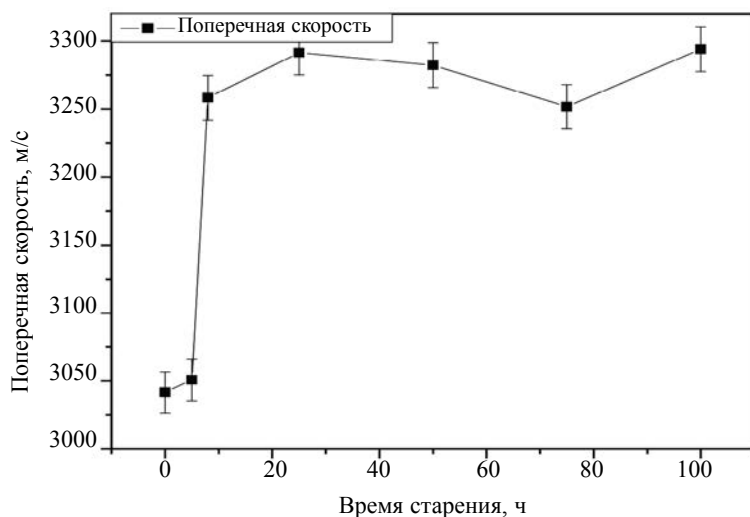


Рис. 10. Влияние времени старения на скорость поперечной волны при температуре 475 °С.

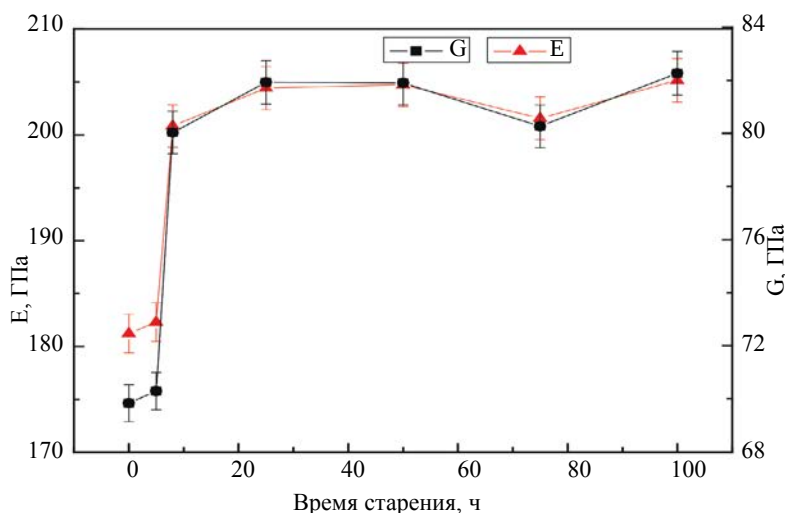


Рис. 11. Зависимость модуля Юнга и модуля сдвига от времени старения.

скорость продольной волны ультразвука V_L увеличивается с увеличением времени старения. Это связано с увеличением модуля Юнга зерен в α -фазе для продольных волн, такое же поведение наблюдалось и для скорости поперечных волн V_T . Появление α' -фазы и обогащенных хромом областей является причиной уменьшения размера зерен. Как известно, ультразвуковые волны очень чувствительны к уменьшению размеров зерен, в результате чего скорость ультразвука увеличивается [24].

Кривые обеих скоростей имеют практически одинаковое поведение с падением скорости на 75 ч старения, что связано с появлением выделений в межфазных границах, а также с наличием неоднородностей в межфазных границах или субзеренных границах феррита. Как следствие, распространение ультразвуковых волн замедляется. На 100 ч явления также имеют место, но структура становится менее неоднородной с наличием выделений в ферритовой матрице и межфазных границах.

Значения упругих констант (модуль Юнга E и модуль сдвига G) представлены на рис. 11. Значения этих параметров увеличиваются от 0 до 50 ч времени старения, что связано с изменением твердости ферритовой фазы, вызванным спинодальным распадом в ферритовой матрице. Затем они уменьшаются после 75 ч, этот результат можно объяснить началом образования межфазных границ и более мелкими размерами зерен. Наконец, эти константы увеличиваются с 75 до 100 ч, поскольку структура становится менее неоднородной. Такое значительное изменение модуля Юнга E и модуля сдвига G с увеличением времени старения объясняется спинодальным распадом, при котором частицы α' -фазы образуются при температуре 475 °С. Полученные результаты показывают, что ультразвуковой контроль обладает высокой чувствительностью к изменениям микроструктуры при 475 °С.

3.5. Параметры коррозии

На рис. 12 показаны кривые потенциала разомкнутой цепи (ПРЦ) в зависимости от времени, которые были получены для различных видов подготовки в растворе HCl концентрацией 1 моль/л. Вначале ПРЦ увеличивается в течение первых нескольких минут после погружения, что указывает на быструю пассивацию на всех поверхностях различных зон. Динамика ПРЦ в образцах демонстрирует анодное поведение, что может быть связано с образованием пассивной защитной пленки на поверхности сплава [25]. После этого ПРЦ медленно изменяется в отрицательную сторону с небольшими флуктуациями до момента установления стабильного состояния. Колебания связаны с тем, что хлорид-ионы начинают атаковать поверхность материала, находящегося в контакте с раствором. Образец, обработанный в течение 50 ч, имеет наименьший благородный потенциал, и он в первую очередь подвергается деградации.

Восприимчивость к коррозии различных образцов в растворе HCl концентрацией 1 моль/л при температуре окружающей среды описывается кривыми потенциодинамической поляризации, показанными на рис. 13а и 13б. По ним определяются различные электрохимические параметры

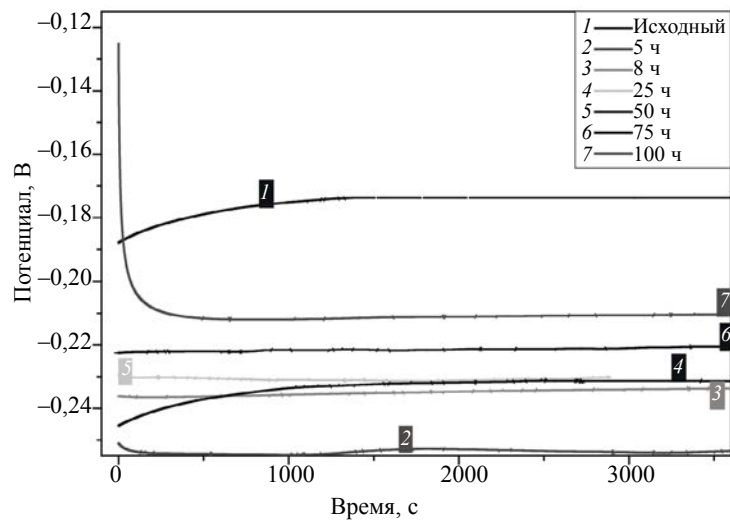


Рис. 12. Зависимость потенциала разомкнутой цепи (ПРЦ) от времени.

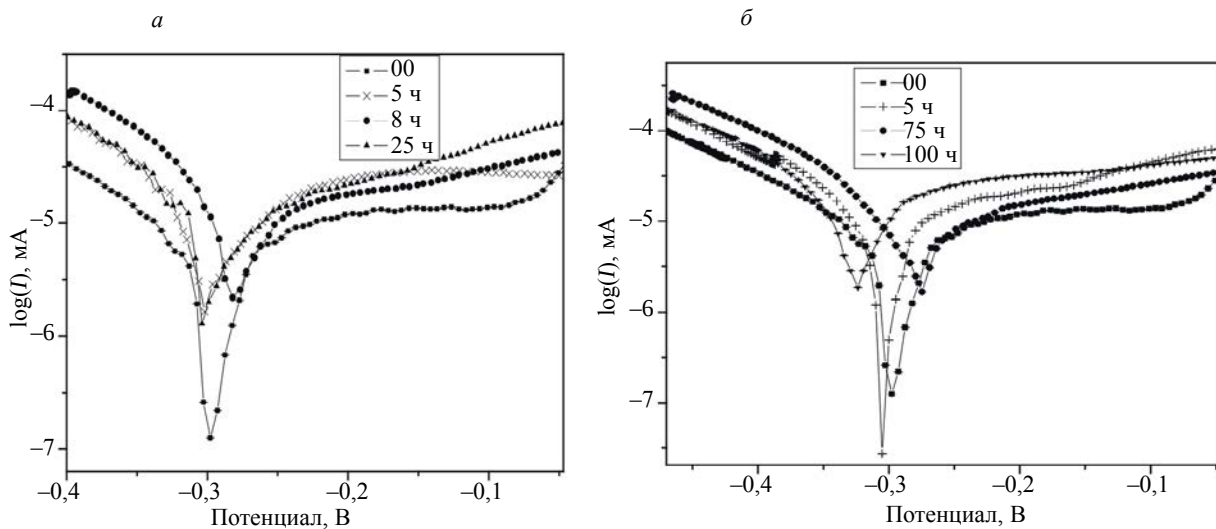


Рис. 13. Кривые потенциодинамической поляризации при времени старения 5, 8 и 25 ч по сравнению с исходным состоянием (а); кривые потенциодинамической поляризации при времени старения 50, 75 и 100 ч по сравнению с исходным состоянием (б).

Таблица 2

Потенциал коррозии и ток коррозии в зависимости от времени старения при 475 °С

Время старения, ч	0	5	8	25	50	75	100
E_{corr} , В	-0,30047	-0,2921	-0,2838	-0,2981	-0,30317	-0,2768	-0,3199
I_{corr} , $\text{A} \times 10^{-5}$	0,5307	1,1886	0,8557	0,9484	0,4722	0,8851	0,6205

— потенциал коррозии (E_{corr}) и плотность тока коррозии (I_{corr}), которые представлены в табл. 2. Кривые поляризации ясно показывают влияние микроструктуры для каждого времени термообработки на коррозионную стойкость. Можно заметить, что при обработке в течение 75 ч были получены наилучшие результаты. Это можно объяснить микроструктурой, морфологией и более мелким размером зерен аустенита [16, 25].

3.6. Оценка состояния образцов после погружения в раствор с помощью вихревых токов

Динамика нормированного импеданса образцов, выдерживаемых при 475 °С после погружения в раствор HCl с концентрацией 1 моль/л в течение 100 дней, приведена на рис. 14. Отмечается, что импеданс увеличивается с увеличением времени погружения в течение 30 первых дней, что связано с тем, что сопротивление более подвержено коррозии, затем нормированный импеданс уменьшается при увеличении времени погружения, это можно объяснить наличием поверхностных дефектов в материале после коррозионной атаки и увеличением степени деградации со временем за счет появления точечной коррозии [17, 26, 27]. Образец, выдержанный в течение 75 ч при температуре 475 °С, имеет низкий нормированный импеданс, что, вероятно, связано с выпадением осадка α' -фазы в образце, который способствует коррозионной атаке, особенно в областях, замещенных Сг. Эти результаты доказывают целесообразность использования метода вихревых токов для оценки коррозионного поведения после охрупчивания при температуре 475 °С.

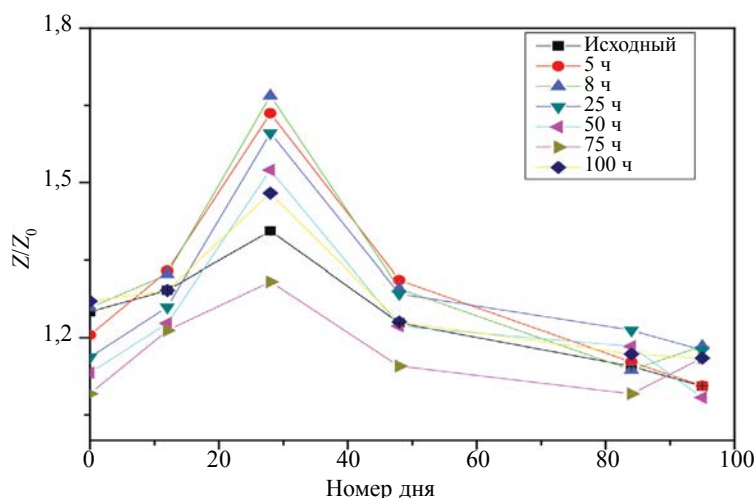


Рис. 14. Влияние времени выдержки в растворе на нормированный импеданс после различного времени старения.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании с помощью неразрушающих методов была проведена оценка микроструктурных изменений при 475 °С в стали DSS 2205 при различных значениях времени старения.

1. Микрофотографии СЭМ показали, что спинодальный распад обнаружен в ферритовых областях, а в аустенитной области не наблюдаются выделения с одновременным изменением размера и формы зерен обеих фаз. Однако выделения в межфазных границах начали появляться при времени обработки 75 ч, и зерна становились более мелкими. Концентрация выделений в межфазных границах становится более очевидной после 100 ч старения.

2. Было установлено, что метод вихретокового контроля является чувствительным методом для обнаружения изменений микроструктуры после охрупчивания при температуре 475 °С. Связь между твердостью материала и вихревыми токами была получена путем анализа нормированного импеданса, который уменьшался со временем старения, причем между нормированным импедансом и твердостью наблюдалось обратное поведение.

3. Результаты, полученные ультразвуковым методом, показали, что скорость ультразвука увеличивалась с увеличением времени старения, что, в основном, связано с увеличением модуля Юнга зерен в α -фазе для продольных волн, и такое же поведение наблюдалось для поперечной скорости. Модуль Юнга и модуль сдвига возрастали с увеличением времени старения, что связано с спинодальным распадом. Затем они уменьшались после 75 ч, данный результат можно объяснить началом образования межфазных границ и более мелкими размерами зерен.

4. Характер изменения потенциала разомкнутой цепи демонстрировал анодное поведение, что может быть связано с образованием пассивной защитной пленки на поверхности материала.

В потенциодинамическом анализе потенциал образцов медленно изменялся в отрицательную сторону с небольшими колебаниями до стабилизации. Образец, обработанный при 50 ч, имеет наименее благородный потенциал и подвергался повреждению в первую очередь. Обработка до 75 ч показала наилучшие результаты.

5. Импеданс возрастал с увеличением времени погружения в течение первых 30 дней, это объясняется значительной устойчивостью к коррозионному воздействию. Затем нормированный импеданс уменьшался, так как со временем усиливалась деградация из-за точечной коррозии. Полученные результаты с помощью вихревых токов показали чувствительность состаренной стали к точечной коррозии, вызванной присутствием образования α' -фазы и других выделений.

Данные результаты доказывают целесообразность использования метода вихревых токов и ультразвукового метода в качестве неразрушающего и быстрого способа оценки изменения микроструктуры и коррозионного поведения при охрупчивании при 475 °C в сталях DSS.

Мы хотим поблагодарить недавно ушедшего из жизни Zergoug Mourad за поддержку и помощь в подготовке этой работы и обучение методу вихревых токов и магнитным методам, до того как он ушел из жизни, что является большой потерей для нас.

Авторы благодарят Mr A. Manseri и Mr. A. Mameri из CRTSE-Algiers за сотрудничество при оценке микроструктуры с помощью СЭМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Argandona G., Biezma M.V., Berrueta J.M., Berlanga C., Ruiz A. Detection of Secondary Phases in UNS S32760 Superduplex Stainless Steel by Destructive and Non-destructive Techniques // Journal of Materials Engineering and Performance. 2016. V. 25. P. 5269—79.
2. Nilsson J.-O. Super duplex stainless steels // Materials Science and Technology. 1992. V. 8. P. 685—700.
3. Gunn R.N. Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications. Woodhead Publishing, 1997.
4. Lo K.H., Shek C.H., Lai J. Recent developments in stainless steels // Materials Science and Engineering. R: Reports. 2009. V. 65. P. 39—104.
5. Chung H.M. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1992. V. 50. P. 179—213.
6. Reidrich G., Loib F. Embrittlement of high chromium steels within temperature range of 570—1100 °F // ArchivFür Das Eisenhüttenwesen. 1941. V. 15. P. 175—82
7. Olsson J., Liljas M. 60 years of duplex stainless steel applications / Proceedings from NACE Corrosion'94. Paper No 395. Baltimore, Maryland, USA, 1994.
8. Charles J. Super duplex stainless steels: structure and properties // Proceedings of Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune Bourcogne, France, 1991. P. 3—48.
9. Solomon H.D., Levinson L.M. Mössbauer effect study of «475 °C embrittlement» of duplex and ferritic stainless steels // Acta Metallurgica. 1978. V. 26. P. 429—42.
10. Tsuchiya S., Ishikawa Y., Ohtaka M., Yoshimura T. JSME International Journal Series A. 1995. V. 38. P. 384.
11. Evanson S., Otaka M., Hasegawa K.J. Engineering Mater. and Technology. 1992. V. 114. P. 42.
12. Maeda N., Goto T., Nakamura T., Naito T., Kumano S., Nakao Y. Int. J. Pres. Ves. & Piping. 1997. V. 71. P. 7.
13. Gutiérrez-Vargas G., López-Morelos V.H., Carreón H., Kim J.Y., Ruiz A. ACPD detection and evaluation of 475°C embrittlement of aged 2507 super duplex stainless steels / AIP conference proceedings 2017. V. 1806. P. 110018.
14. Gutiérrez-Vargas G., Ruiz A., Kim J.Y., López-Morelos V.H., Ambriz R.R. Evaluation of thermal embrittlement in 2507 super duplex stainless steel using thermoelectric power // Nucl. Eng. Technol. 2019. V. 51. P. 1816—1821.
15. Camerini C., Sacramento R., Areiza M.C., Rocha A., Santos R., Rebello J.M., Pereira G. Eddy Current Techniques for Super Duplex Stainless Steel Characterization // J. Magn. Magn. Mater. 2015. V. 388. P. 96—100.
16. Ziouche A., Zergoug M., Boucherou N., Boudjellal H., Mokhtari M., Abaidia S. Pulsed Eddy Current Signal Analysis of Ferrous and Non-Ferrous Metals under Thermal and Corrosion Solicitations // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 9. P. 652—659.
17. Ziouche A., Haddad A., Badji R., Zergoug M., Zoubiri N., Bedjaoui W., Abaidia S. Microstructure, Corrosion and Magnetic Behavior of an Aged Dual-Phase Stainless Steel // J. Materials Engineering and Performance. 2018.
18. Araújo Freitas V.L., Normando P.G., Albuquerque V.H.C., Silva E. Macedo, Silva A.A., Tavares J.M.R.S. Nondestructive characterization and evaluation of embrittlement kinetics and elastic constants of duplex stainless steel SAF 2205 for different aging times at 425°C and 475°C // J. Alloys Compd. 2011. V. 30. P. 130—136.

19. Redjaimia A., Morniroli J.P., Donnadieu P., Metauer G. Microstructural and Analytical Study of Heavily Faulted Frank-Kasper R-Phase Precipitates in the Ferrite of a Duplex Stainless Steel // J. Mater. Sci. 2002. V. 37. No. 19. P. 4079—4091.
 20. Örnek C., Burke M.G., Hashimoto T., Lim J.J.H., D. L. 475° C embrittlement of duplex stainless steel — a comprehensive microstructure characterization study Engelberg // Materials Performance Characterization. 2017. V. 6 (4).
 21. Pareige C., Emo J., Saillet S., Domain C., Pareige P. Kinetics of G-phase precipitation and spinodal decomposition in very long aged ferrite of a Mo-free duplex stainless steel // Journal of Nuclear Materials. 2015. V. 465. P. 383—389.
 22. Zergoug M. et al. Relation between mechanical microhardness and impedance variations in Eddy current testing // NDT&E Int. 2004. V. 37. P. 65—67.
 23. Tavares S.S.M., de Noronha R.F., da Silva M.R., Neto J.M., Pairis S. 475 °C Embrittlement in a Duplex Stainless Steel UNS S31803 // Mater. Res. 2001. V. 4. No. 4. P. 237—240.
 24. Silva E.M., Albuquerque V.H.C., Leite J.P., Varela A.C.G., Moura E.P., Tavares J.M.R.S. Phase on a UNS S31803 duplex stainless steel based on nondestructive testing // Mater. Sci. Eng. A. 2009. V. 516. P. 126—130.
 25. Lekbir C., Dahoun N., Guetitech A. et al. Effect of Immersion Time and Cooling Mode on the Electrochemical Behavior of Hot-Dip Galvanized Steel in Sulfuric Acid Medium // Journal of Materials Engineering and Performance. 2017. V. 26 (6). P. 2502—2511.
 26. Lima H.M.L.F., Bastos I.N., Araújo W.S., Martins M. Heat treatment effects on ASTM A890/A 890M GR 5A super duplex stainless steel passivity // Mater Res. 2018. V. 20. Suppl. 2. P. 775—85.
 27. Allou D., Ould Brahim I., Cheniti B., et al. Effect of Post Weld Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Behaviors of Weld Overlay Inconel 182 on 4130 Steel Substrate Using SMAW Process Metallography // Microstructure and Analysis. 2021. V. 10 (5). P. 567—578.
-

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СЭНДВИЧ-ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. В.А. Удод^{1,*}, С.П. Осипов^{2,**}, С.Ю. Назаренко^{2,***}

¹Томский государственный университет, Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 36

²Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: *pr.udod@mail.ru; **osip1809@rambler.ru; ***svetanaz@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2023; после доработки 17.02.2023

Принята к публикации 17.02.2023

Приводится описание алгоритма оптимизации параметров сэндвич-детекторов рентгеновского излучения применительно к распознаванию материалов методом дуальных энергий. Применение алгоритма проиллюстрировано на конкретном примере, где были получены значения толщин первого детектора и промежуточного фильтра (входящих в состав сэндвич-детектора), которые для заданных материалов первого детектора (CsI) и промежуточного фильтра (Cu) являются оптимальными при распознавании взрывчатых веществ.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, алгоритм, оптимизация, сэндвич-детектор, методы дуальных энергий, распознавание материалов, эффективный атомный номер.

DOI: 10.31857/S0130308223030041, **EDN:** OPADUK

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время досмотр багажа и ручной клади пассажиров, грузовых контейнеров и т.п., выполняемый на основе рентгеновского контроля, является неотъемлемым компонентом для большинства аэропортов, крупных железнодорожных станций и таможенных пунктов [1—8]. Среди различных типов систем, используемых для этой цели, наибольшее распространение в последние десятилетия получили сканирующие системы цифровой рентгенографии (ССЦР) [1, 2, 9—11].

Процесс функционирования ССЦР состоит в просвечивании объекта контроля (ОК) коллимированным потоком рентгеновского излучения веерообразной формы с последующей регистрацией излучения, прошедшего через ОК, коллимированным одномерным (линейным) матричным массивом детекторов [2, 9].

Для повышения эффективности досмотра современные рентгеновские инспекционные комплексы наделяются функцией распознавания материалов, позволяющей с определенной надежностью обнаруживать опасные либо запрещенные вложения в ОК (в частности взрывчатые и наркотические вещества и т.д.) [1, 2, 10, 11].

Следует заметить, что помимо досмотрового контроля распознавание материалов широко применяется и при проведении различных диагностических исследований с использованием рентгеновских компьютерных томографов [12—15].

Физико-математической основой распознавания материалов с применением рентгеновского излучения является метод дуальных энергий (МДЭ) [8, 16—18]. Согласно этому методу, распознавание материала осуществляется по его эффективному атомному номеру (ЭАН) [16—18]. Для определения (оценки) ЭАН формируется, а затем с помощью некоторого математического программного обеспечения решается система из двух уравнений, соответствующих двум различным максимальным (эффективным) энергиям просвечивающего излучения [3, 5, 16, 17]. При этом левые части уравнений применительно к досмотровым ССЦР представляют собой теоретические радиационные прозрачности ОК (толщины в длинах свободного пробега), аналитически выражаемые как функции от ЭАН и массовой толщины материала ОК, а правые части — экспериментальные радиационные прозрачности ОК (толщины в длинах свободного пробега), полученные (в реальном физическом эксперименте) при тех же максимальных (эффективных) энергиях [9, 17, 19].

Различные схемы реализации МДЭ описаны в [9, 10, 14, 17, 19] и согласно одной из них, чаще всего применяемой при досмотре багажа и ручной клади пассажиров, ОК сканируется однократно, а прошедшее через него излучение регистрируется одномерным матричным массивом (линейкой) из сэндвич-детекторов, каждый из которых имеет следующую структуру по ходу пучка рентгеновского излучения: первый (передний) детектор — промежуточный фильтр — второй (задний) детектор [10, 20, 21]. Промежуточный фильтр обычно представляет собой пластинку из меди [10].

В [22] был разработан алгоритм оценки погрешностей ЭАН при распознавании материалов в системе рентгеновского контроля, содержащей сэндвич-детекторы излучения. В настоящей статье, на основе отмеченного алгоритма, предлагается новый алгоритм, предназначенный для оптимизации параметров сэндвич-детектора излучения, а именно — оптимизации ЭАН и толщины первого детектора и толщины промежуточного фильтра. Критерием оптимальности является минимум погрешности оценки ЭАН методом дуальных энергий, порождаемой квантовой природой рентгеновского излучения.

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СЭНДВИЧ-ДЕТЕКТОРОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ПОГРЕШНОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОГО АТОМНОГО НОМЕРА МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

Сэндвич-детектор состоит из радиационно-чувствительных элементов (РЧЭ) первого и второго детекторов и промежуточного фильтра. Пусть индекс 1 ассоциируется с РЧЭ первого детектора, 2 — с РЧЭ второго детектора, а f — промежуточного фильтра. При описании ОК индекс отсутствует. Каждый из структурных элементов сэндвич-детектора и объект контроля характеризуется ЭАН материала Z и массовой толщиной ρH . Под массовой толщиной ρH объекта или РЧЭ понимается произведение плотности ρ соответствующего материала на его толщину H .

Для формализации записи и облегчения перевода в программный код все варьируемые параметры алгоритма могут быть сведены в матрицу параметров $\mathbf{P}$:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} Z_1 & Z_f & Z_2 \\ \rho_1 H_1 & \rho_f H_f & \rho_2 H_2 \end{pmatrix}.$$

Алгоритм оптимизации можно представить в виде совокупности нескольких этапов.

Этап 1. Назначается максимальная энергия E_0 рентгеновского излучения.

Этап 2. Определяется числовой энергетический спектр $g(E, E_0)$ источника рентгеновского излучения.

Этап 3. Задается матрица параметров сэндвич-детектора $\mathbf{P}$.

Этап 4. Указывается диапазон изменения ЭАН Z материалов ОК, $Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}$, подлежащих распознаванию методом дуальных энергий.

Этап 5. Устанавливаются нижняя $d_{\min}$ и верхняя $d_{\max}$ границы радиационной прозрачности ОК.

Этап 6. Строится множество допустимых значений параметров ОК $\mathbf{D}(\mathbf{P}) \subset \mathbb{R}^2$ с учетом ограничений 4 и 5 этапов:

$$\mathbf{D}(\mathbf{P}) = \left\{ (Z, \rho H) \mid Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}, d_{\min} \leq d_{t1}(Z, \rho H, \mathbf{P}^{(1)}) < d_{t2}(Z, \rho H, \mathbf{P}) \leq d_{\max} \right\},$$

здесь $\mathbf{P}^{(1)}$ — первый столбец матрицы $\mathbf{P}$; $d_{t1}(Z, \rho H, \mathbf{P}^{(1)})$, $d_{t2}(Z, \rho H, \mathbf{P})$ — теоретические значения радиационных прозрачностей ОК, соответствующие первому и второму детекторам сэндвича и вычисляемые по формулам, аналогичным приведенным в [23]:

$$d_{t1}(Z, \rho H, \mathbf{P}^{(1)}) = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H) \bar{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E, \mathbf{P}^{(1)}) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \bar{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E, \mathbf{P}^{(1)}) dE};$$

$$d_{t2}(Z, \rho H, \mathbf{P}) = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp\left(-m(E, Z)\rho H - \sum_{i=1}^2 m(E, P_{1i})P_{2i}\right) \bar{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2(E, \mathbf{P}^{(3)}) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp\left(-\sum_{i=1}^2 m(E, P_{1i})P_{2i}\right) \bar{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2(E, \mathbf{P}^{(3)}) dE},$$

где $m(E, Z)$, $m(E, P_{11})$, $m(E, P_{12})$ — массовые коэффициенты ослабления (МКО) фотонов с энергией E для материалов ОК, РЧЭ первого детектора и промежуточного фильтра соответственно, см²/г; $\bar{E}_{ab1}(E)$, $\bar{E}_{ab2}(E)$ — средние значения поглощенной энергии зарегистрированного фотона с энергией E для РЧЭ первого и второго детекторов соответственно, МэВ;

$\varepsilon_1(E, \mathbf{P}^{(1)}) = 1 - \exp(-m(E, P_{11})P_{21})$, $\varepsilon_2(E, \mathbf{P}^{(3)}) = 1 - \exp(-m(E, P_{13})P_{23})$ — эффективности регистрации квантов излучения с энергией E для РЧЭ первого и второго детекторов; $\mathbf{P}^{(3)}$ — третий столбец матрицы $\mathbf{P}$.

Из описания множества $\mathbf{D}(\mathbf{P})$ следует, что уравнения:

$$d_{t1}(Z, (\rho H)_{\max}(Z), \mathbf{P}^{(1)}) = d_{\min}, \quad d_{t2}(Z, (\rho H)_{\min}(Z), \mathbf{P}) = d_{\max}$$

для фиксированного значения Z определяют для заданной матрицы параметров $\mathbf{P}$ минимальное $(\rho H)_{\min}(Z)$ и максимальное $(\rho H)_{\max}(Z)$ допустимые значения массовых толщины ОК.

Этап 7. Проводится повторение этапов 3—6 для фиксированных материалов РЧЭ первого и второго детекторов (т.е. значение ЭАН Z_1 и Z_2 считаются фиксированными) и разных, но заранее определенных, комбинаций значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$ и $\rho_f H_f$ (массовых толщин РЧЭ первого и второго детекторов, а также промежуточного фильтра).

В результате выполнения данного этапа будет сформирована совокупность множеств допустимых решений $\mathbf{D}(\mathbf{P})$, соответствующих фиксированным значениям ЭАН Z_1 , Z_2 и различным комбинациям значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$, $\rho_f H_f$.

Этап 8. «Минимальное множество допустимых решений» $\mathbf{D}_0(Z_1, Z_2)$ находится для фиксированных значений параметров Z_1 , Z_2 и представляет собой пересечение совокупности множеств $\mathbf{D}(\mathbf{P})$, полученных на этапе 7, т.е.

$$\mathbf{D}_0(Z_1, Z_2) = \bigcap_{\mathbf{P}} \mathbf{D}(\mathbf{P}).$$

Этап 9. Задается множество тестовых ОК $\mathbf{D}_t(Z_1, Z_2)$ для фиксированных значений параметров Z_1 , Z_2 как некоторое подмножество минимального множества допустимых решений $\mathbf{D}_0(Z_1, Z_2)$, т.е. определяется множество пар $(Z_t, (\rho H)_t)$ из $\mathbf{D}_0(Z_1, Z_2)$, где Z_t и $(\rho H)_t$ — соответственно ЭАН материала тестового ОК и его массовая толщина.

Заметим, что задание множества тестовых ОК описанным способом гарантирует принадлежность всех тестовых ОК каждому из множеств допустимых решений $\mathbf{D}(\mathbf{P})$, соответствующих различным, но заранее определенным комбинациям значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$, $\rho_f H_f$.

Этап 10. Для фиксированной тройки значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$, $\rho_f H_f$ для каждого тестового ОК вычисляются радиационные прозрачности $d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)})$ и $d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P})$.

Этап 11. Задается значение параметра

$$\sigma_0 = \sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E^2 dE} / \sqrt{C_{id} \int_0^{E_0} g(E, E_0) E dE},$$

здесь C_{id} — обобщенный параметр, характеризующий источник и сэндвич-детектор излучения [16].

Параметр σ_0 , согласно [23, 24], представляет собой относительное среднеквадратическое отклонение (СКО) заряда (энергии), регистрируемого идеальным детектором за фиксированный промежуток времени T при отсутствии ОК. Идеальный детектор является гипотетическим детектором полного поглощения, причем его поперечные размеры и местоположение идентичны первому детектору.

Выражение для оценки параметра σ_0 может быть представлено в соответствии с [24] в следующей эквивалентной форме:

$$\sigma_0 = \frac{\eta}{\sqrt{N_q}},$$

где

$$\eta = \frac{\sqrt{E^2}}{\bar{E}} = \sqrt{\frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E^2 dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) dE}} / \sqrt{\frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) dE}}$$

— коэффициент амплитудного разброса поглощенной энергии регистрируемых фотонов для идеального детектора рентгеновского излучения;

$$N_q = C_{id} \int_0^{E_0} g(E, E_0) dE$$

— среднее число фотонов, регистрируемых идеальным детектором за время T при отсутствии ОК.

Этап 12. Вычисляется значение СКО $\sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{(1)})$ шума Φ_1 , соответствующего теоретической прозрачности $d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)})$ тестового ОК для РЧЭ первого детектора, основываясь на формулах из [23]:

$$\begin{aligned} \sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{(1)}) &= \frac{\sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{(1)})}{\sigma_0} \sigma_0 = \\ &= \frac{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z_t)(\rho H)_t) \overline{E_{ab1}^2(E)} \varepsilon_1(E, \mathbf{P}^{(1)}) dE \cdot \int_0^{E_0} g(E, E_0) E dE}}{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E^2 dE \cdot \int_0^{E_0} g(E, E_0) \overline{E_{ab1}(E)} \varepsilon_1(E, \mathbf{P}^{(1)}) dE}} \cdot \sigma_0. \end{aligned}$$

Этап 13. Определяется значение СКО $\sigma(\Phi_2, \mathbf{P})$ шума Φ_2 , соответствующего теоретической прозрачности $d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P})$ тестового ОК для второго детектора, также основываясь на формулах из [23]:

$$\begin{aligned} \sigma(\Phi_2, \mathbf{P}) &= \frac{\sigma(\Phi_2, \mathbf{P})}{\sigma_0} \sigma_0 = \\ &= \frac{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp\left(-m(E, Z_t)(\rho H)_t - \sum_{i=1}^2 m(E, P_{li}) P_{2i}\right) \overline{E_{ab2}^2(E)} \varepsilon_2(E, P^{(3)}) dE \cdot \int_0^{E_0} g(E, E_0) E dE}}{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E^2 dE \cdot \int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp\left(-\sum_{i=1}^2 m(E, P_{li}) P_{2i}\right) \overline{E_{ab2}(E)} \varepsilon_2(E, P^{(3)}) dE}} \cdot \sigma_0. \end{aligned}$$

Этап 14. Осуществляется розыгрыш случайных величин — шумов Φ_1 и Φ_2 в предположении их независимости, нормальности распределения, равенства нулю их математических ожиданий и равенства их СКО значениям $\sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{(1)})$ и $\sigma(\Phi, \mathbf{P})$ соответственно.

Этап 15. Находятся экспериментальные (фактические) уровни радиационных прозрачностей тестового ОК для детекторов сэндвича:

$$d_1(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)}) = d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)}) + \Phi_1;$$

$$d_2(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}) = d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}) + \Phi_2.$$

Этап 16. Оцениваются параметры Z_t и $(\rho H)_t$ путем решения относительно $(Z, \rho H) \in \mathbf{D}_0(Z_1, Z_2)$ системы уравнений вида:

$$\begin{cases} d_{t1}(Z, \rho H, \mathbf{P}^{(1)}) = d_1(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)}), \\ d_{t2}(Z, \rho H, \mathbf{P}) = d_2(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}). \end{cases}$$

Этап 17. Проводится n -кратное повторение этапов 14 — 16 для неизменных значений СКО $\sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{(1)})$ и $\sigma(\Phi_2, \mathbf{P})$. В итоге для каждого тестового ОК получается множество $\mathbf{Res} = \{(Z_i, (\rho H)_i) | i = 1, 2, \dots, n\}$, состоящее из n оценок параметров Z_t и $(\rho H)_t$.

Этап 18. Для каждого отдельного тестового ОК на основе множества оценок **Res**, полученного для него на этапе 17, находят среднее значения Z_m , СКО m_z и относительные среднеквадратические погрешности δ_z оценки параметра Z_i :

$$Z_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i, \quad m_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_i)^2}, \quad \delta_z = \frac{m_z}{Z_i} \cdot 100 \ %.$$

Этап 19. Этапы 10—18 повторяются для всевозможных (заранее определенных) комбинаций значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$ и $\rho_f H_f$.

В результате выполнения данного этапа формируются «таблицы погрешностей» оценок ЭАН тестовых ОК. Число таких таблиц равно числу рассмотренных комбинаций анализируемых параметров.

Этап 20. Находится оптимальная комбинация $((\rho_1 H_1)_{\text{opt}}(Z_1, Z_2), (\rho_f H_f)_{\text{opt}}(Z_1, Z_2), (\rho_2 H_2)_{\text{opt}}(Z_1, Z_2))$ значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$ и $\rho_f H_f$ на основе анализа всей совокупности «таблиц погрешностей», полученных на этапе 19. При этом в качестве оптимальной может считаться та комбинация, для которой максимальная погрешность оценки атомного номера является минимальной (либо максимальная относительная погрешность оценки атомного номера является минимальной), т.е. оптимальность подразумевается по критерию минимакса (наилучшим образом для наихудшего случая).

Этап 21. Этапы 3—20 повторяются для разных (заранее определенных) значений параметров Z_1, Z_2 .

В результате выполнения данного этапа формируется множество **D**, состоящее из элементов вида $(Z_1, Z_2, (\rho_1 H_1)_{\text{opt}}(Z_1, Z_2), (\rho_f H_f)_{\text{opt}}(Z_1, Z_2), (\rho_2 H_2)_{\text{opt}}(Z_1, Z_2))$.

Этап 22. Находится оптимальная комбинация $(Z_{1\text{opt}}, Z_{2\text{opt}}, (\rho_1 H_1)_{\text{opt}}(Z_{1\text{opt}}, Z_{2\text{opt}}), (\rho_f H_f)_{\text{opt}}(Z_{1\text{opt}}, Z_{2\text{opt}}), (\rho_2 H_2)_{\text{opt}}(Z_{1\text{opt}}, Z_{2\text{opt}}))$ матрицы параметров **P**, т.е. находится оптимальный элемент множества **D** на основе анализа «таблиц погрешностей», соответствующих различным элементам данного множества.

Очевидно, что в случае оптимизации параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$ и $\rho_f H_f$ (или H_1 , H_2 и H_f) для заданных значений параметров Z_1, Z_2 следует ограничиться этапами 1—20 вышеописанного алгоритма.

Заметим также, что и другие варианты оптимизационных задач (задано Z_1 и $\rho_1 H_1$, а оптимизировать $\rho_f H_f$, либо задано Z_1 и $\rho_f H_f$, а оптимизировать $\rho_1 H_1$ и т.д.) могут быть также решены на основе предлагаемого алгоритма.

Приведем теперь конкретный пример использования данного алгоритма.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА

Этап 1. Пусть $E_0 = 160$ кэВ.

Этап 2. По аналогии с [22] примем, что

$$g(E, E_0) = C \frac{E_0 - E}{E} \exp(-m(E, Z_g)(\rho H)_g),$$

здесь C — некоторый постоянный множитель; $m(E, Z_g)$ — МКО излучения материалом выходного окна рентгеновской трубки (силикатным стеклом SiO_2 толщиной 1,5 мм) с массовой толщиной $(\rho H)_g$.

Этап 3. Предположим, учитывая результаты работ [22, 25], что первый (передний) детектор изготовлен из CsI (при этом основной процесс взаимодействия с излучением — фотоэффект), промежуточный фильтр представляет собой медную пластину, а второй (задний) детектор является детектором полного поглощения. Исходя из этого, при проведении моделирования будем полагать:

$$\bar{E}_{ab1}(E)/E = \overline{E_{ab1}^2}(E)/E^2 = 1; \quad \varepsilon_2(E) = \bar{E}_{ab2}(E)/E = \overline{E_{ab2}^2}(E)/E^2 = 1.$$

Предположим также, что толщина H_1 РЧЭ первого детектора и толщина H_f промежуточного фильтра могут изменяться следующим образом:

$$H_1 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \text{ мм}; \quad H_f = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1 \text{ мм}.$$

Соответственно при этом:

$$\rho_1 H_1 = 0,0451; 0,09; 0,135; 1,8; 0,226 \text{ г/см}^2; \quad \rho_f H_f = 0,27; 0,45; 0,63; 0,81; 0,99 \text{ г/см}^2.$$

Таким образом, всего имеем 25 различных комбинаций (пар) значений параметров H_1 и H_f (или, что равносильно, 25 пар значений параметров $\rho_1 H_1$ и $\rho_f H_f$).

Этап 4. Положим: $Z_{\min} = 3$ (Li), $Z_{\max} = 30$ (Zn).

Этап 5. Положим, по аналогии с [15]:

$$d_{\min} = 1 / 2^{16} \approx 1,526 \cdot 10^{-5}; \quad d_{\max} = d_{t2}(Z_{\text{Fe}}, (\rho H_{\min})_{\text{Fe}}) = d_{t2}(26; 0,063),$$

где 2^{16} — число уровней квантования аналого-цифровых преобразователей, имеющих разрядность $m = 16$; $Z_{\text{Fe}} = 26$ — атомный номер железа; $(\rho H_{\min})_{\text{Fe}} = 0,063$ г/см² — минимальная массовая толщина стальной проволоочки, которую обнаруживает комплекс досмотрового рентгеновского контроля, описанный в [26].

В табл. 1 представлены результаты вычислений прозрачностей $d_{\max}$ для всех 25 различных комбинаций значений параметров H_1 и H_f , описанных на этапе 3.

Таблица 1

Максимальные теоретические прозрачности для второго (заднего) детектора для различных комбинаций значений параметров H_1 и H_f

H_f , мм	H_1 , мм				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,95155	0,95874	0,96354	0,96689	0,96929
0,5	0,95909	0,9638	0,96697	0,9693	0,97104
0,7	0,96323	0,96655	0,96894	0,97075	0,97218
0,9	0,96597	0,96848	0,97038	0,97187	0,97307
1,1	0,96798	0,96997	0,97153	0,97278	0,97383

Этапы 6, 7. Строим множества допустимых решений для всех выбранных (на этапе 3) 25 комбинаций значений параметров H_1 и H_f .

На рис. 1 (для наглядности) изображены границы данных множеств при $H_1 = 0,1$ мм. Заметим при этом, что $(\rho H)_{\max}(Z)$ зависит только от $\rho_1 H_1$, т.к. теоретическая прозрачность для первого детектора не зависит от промежуточного фильтра.

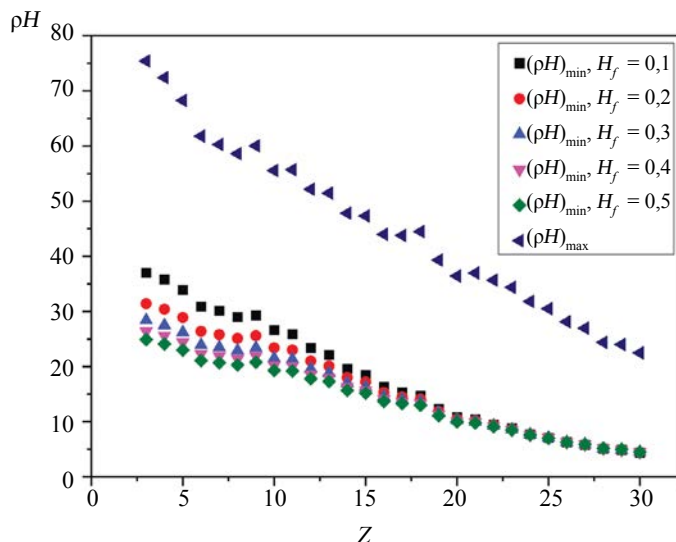


Рис. 1. Зависимости минимального $(\rho H)_{\min}$ и максимального $(\rho H)_{\max}$ значений массовой толщины ОК от эффективного атомного номера Z при $H_1 = 0,1$ мм для разных значений параметра H_f .

Таблица 2

Нижняя $(\rho H)_-(Z)$ и верхняя $(\rho H)_+(Z)$ границы «минимального множества допустимых решений» $D_0(Z_1)$ для целочисленных значений Z

Z	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$(\rho H)_-(Z)$, г/см ²	0,37	0,358	0,339	0,309	0,301	0,29	0,293	0,266	0,259
$(\rho H)_+(Z)$, г/см ²	75,401	72,387	68,243	61,774	60,25	58,589	60,013	55,561	55,696
Z	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$(\rho H)_-(Z)$, г/см ²	0,234	0,221	0,196	0,185	0,163	0,153	0,147	0,123	0,108
$(\rho H)_+(Z)$, г/см ²	52,146	51,464	47,808	47,296	43,979	43,765	44,463	39,302	36,419
Z	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$(\rho H)_-(Z)$, г/см ²	0,104	0,095	0,088	0,077	0,071	0,063	0,059	0,052	0,05
$(\rho H)_+(Z)$, г/см ²	36,957	35,673	34,364	31,807	30,483	28,116	26,945	24,388	24,009

Этап 8. Находим верхнюю $(\rho H)_+(Z)$ и нижнюю $(\rho H)_-(Z)$ границы «минимального множества допустимых решений» $D_0(Z_1)$ для целочисленных значений Z (табл. 2), учитывая, что $3 \leq Z \leq 30$:

$$(\rho H)_+(Z) = \min_{H_1} \{(\rho H)_{\max}(Z) | H_1 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \text{ мм}\};$$

$$(\rho H)_-(Z) = \max_{H_1, H_f} \{(\rho H)_{\min}(Z) | H_1 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \text{ мм}; H_f = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1 \text{ мм}\}.$$

Находим путем линейной интерполяции верхнюю и нижнюю границы «минимального множества допустимых решений» для нецелочисленных значений Z .

Строим и запоминаем в дискретизированной форме полноформатное «минимальное множество допустимых решений» $D_0(Z_1)$. При этом дискретизация по Z и ρH происходит соответственно с шагом 0,1 и 0,1 г/см².

Таблица 3

Атомные номера, массовые толщины тестовых ОК и их теоретические радиационные прозрачности, соответствующие первому и второму детекторам при $H_1 = 0,1$ мм; $H_f = 0,3$ мм

$Z_t = 6$	Радиационные прозрачности	$(\rho H)_p$, г/см ²				
		1	2	5	10	20
$Z_t = 6$	$d_{t1}(Z_p, (\rho H)_p, \mathbf{P}^{(1)})$	0,7881	0,6289	0,3333	0,124	0,0191
	$d_{t2}(Z_p, (\rho H)_p, \mathbf{P})$	0,8513	0,7249	0,4484	0,2024	0,042
$Z_t = 13$	Радиационные прозрачности	$(\rho H)_p$, г/см ²				
		0,7	1,5	3	6	15
	$d_{t1}(Z_p, (\rho H)_p, \mathbf{P}^{(1)})$	0,6156	0,4275	0,2443	0,0975	0,0115
$Z_t = 13$	$d_{t2}(Z_p, (\rho H)_p, \mathbf{P})$	0,856	0,721	0,5287	0,2927	0,0561
$Z_t = 26$	Радиационные прозрачности	$(\rho H)_p$, г/см ²				
		0,3	0,6	1,5	4	10
	$d_{t1}(Z_p, (\rho H)_p, \mathbf{P}^{(1)})$	0,4051	0,2498	0,0998	0,0227	0,0022
$Z_t = 26$	$d_{t2}(Z_p, (\rho H)_p, \mathbf{P})$	0,8048	0,6696	0,4208	0,1518	0,0223

Этапы 9, 10. В качестве тестовых материалов возьмем С, Al и Fe. Соответствующие им массовые толщины приведены в табл. 3. Там же, в качестве примера, приведены теоретические радиационные прозрачности $d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{(1)})$ и $d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P})$, соответствующие первому и второму детекторам для пары значений: $H_1 = 0,1$ мм; $H_f = 0,3$ мм (или, что равносильно, для пары значений: $\rho_1 H_1 = 0,0451$ г/см²; $\rho_f H_f = 0,27$ г/см²).

Этап 11. Зададим следующие значения параметра σ_0 : 0,001; 0,003; 0,01; 0,03.

Этапы 12, 13. В табл. 4 (в качестве примера) представлены результаты вычислений СКО $\sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{(1)})$ шума Φ_1 и СКО $\sigma(\Phi_1, \mathbf{P})$ шума Φ_2 для всех выбранных (на этапе 11) значений параметра σ_0 при $H_1 = 0,1$ мм и $H_f = 0,3$ мм.

Таблица 4

СКО шумов Φ_1 и Φ_2 при $H_1 = 0,1$ мм и $H_f = 0,3$ мм

Z_t	σ_0	СКО	$(\rho H)_r$, г/см ²				
			1	2	5	10	20
6	0,001	$\sigma(\Phi_1)$	0,0013	0,0012	0,0009	0,0006	0,0002
	0,003		0,004	0,0037	0,0027	0,0017	0,0007
	0,01		0,0134	0,0122	0,0091	0,0058	0,0024
	0,03		0,0403	0,0365	0,0274	0,0173	0,0071
	0,001	$\sigma(\Phi_2)$	0,0016	0,0015	0,0012	0,0008	0,0004
	0,003		0,0048	0,0045	0,0035	0,0024	0,0011
	0,01		0,0161	0,0149	0,0118	0,008	0,0037
	0,03		0,0483	0,0447	0,0354	0,024	0,0111
Z_t	σ_0	СКО	$(\rho H)_r$, г/см ²				
			0,7	1,5	3	6	15
13	0,001	$\sigma(\Phi_1)$	0,0013	0,0011	0,0009	0,0006	0,0002
	0,003		0,0038	0,0033	0,0026	0,0017	0,0006
	0,01		0,0126	0,0108	0,0086	0,0057	0,0022
	0,03		0,0377	0,0325	0,0257	0,0172	0,0065
	0,001	$\sigma(\Phi_2)$	0,0016	0,0015	0,0013	0,001	0,0004
	0,003		0,0049	0,0045	0,0039	0,003	0,0013
	0,01		0,0162	0,015	0,013	0,0099	0,0045
	0,03		0,0487	0,045	0,039	0,0296	0,0134
Z_t	σ_0	СКО	$(\rho H)_r$, г/см ²				
			0,3	0,6	1,5	4	10
26	0,001	$\sigma(\Phi_1)$	0,0011	0,0009	0,0006	0,0003	0,0001
	0,003		0,0033	0,0027	0,0019	0,001	0,0003
	0,01		0,0109	0,009	0,0062	0,0032	0,0011
	0,03		0,0326	0,027	0,0185	0,0096	0,0033
	0,001	$\sigma(\Phi_2)$	0,0016	0,0015	0,0012	0,0008	0,0003
	0,003		0,0048	0,0044	0,0036	0,0023	0,0009
	0,01		0,016	0,0148	0,0121	0,0076	0,003
	0,03		0,0479	0,0444	0,0362	0,0227	0,0091

Этапы 14—20. Выполнение этапов 14—20 осуществлялось в пакете «MathCad», где производилось $n = 10000$ моделирований значений шумов Φ_1 и Φ_2 для каждого значения параметра σ_0

для каждого тестового ОК и каждой комбинации значений параметров H_1 , H_f . Соответствующие результаты отображены в табл. 5—7. В любой внутренней ячейке данных таблиц приведены три числа, разделенные наклонными линиями. Первое число означает максимальное значение СКО, второе — максимальное значение относительной среднеквадратической погрешности, а третье — соответствующую им массовую толщину тестового ОК. Так, например, в табл. 5 для $H_1 = 0,1$ мм, $H_f = 0,3$ мм и $\sigma_0 = 0,001$ приведена тройка чисел 0,12/1,95/1. Это означает: $(m_z)_{\max} = 0,12$; $(\delta_z)_{\max} = 1,95\%$; $(\rho H)_i = 1$ г/см².

Таблица 5

**Максимальные погрешности оценки эффективного атомного номера
для тестового материала $Z_t = 6$ (углерод) для разных значений параметров H_1 и H_f**

H_f , мм	σ_0	H_1 , мм				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,001	0,12/1,95/1	0,14/2,27/1	0,16/2,6/1	0,18/2,92/1	0,19/3,25/1
	0,003	0,35/5,8/1	0,41/74,91/1	0,47/7,76/1	0,53/8,88/1	0,59/9,78/1
	0,01	1,31/21,8/1	1,52/25,4/1	1,73/28,86/1	1,92/31,94/1	2,08/34,67/1
	0,03	5,23/87,22/20	4,49/74,91/1	5,13/85,41/1	5,76/95,9/1	6,28/104,63/1
0,5	0,001	0,12/2,07/1	0,15/2,41/1	0,16/2,71/1	0,19/3,1/1	0,2/3,4/1
	0,003	0,37/6,14/1	1,14/18,94/2	0,49/8,22/1	0,56/9,27/1	0,62/10,4/1
	0,01	1,39/23,1/1	1,61/26,87/1	1,81/30,22/1	2,22/36,92/1	2,17/36,18/1
	0,03	5,05/84,18/20	4,88/81,3/1	5,44/90,64/1	6,13/102,2/1	6,67/111,2/1
0,7	0,001	0,13/2,2/1	0,15/2,54/1	0,18/2,93/1	0,19/3,24/1	0,22/3,6/1
	0,003	0,39/6,52/1	0,46/7,67/1	0,64/10,73/1	0,59/9,88/1	0,66/10,9/1
	0,01	1,47/24,47/1	1,69/28,19/1	2,98/49,69/1	2,09/34,86/1	2,26/37,66/1
	0,03	4,94/82,37/20	5,28/87,95/1	6,06/100,95/1	6,47/107,9/1	7,04/117,4/1
0,9	0,001	0,14/6,9/1	0,16/2,7/1	0,18/3,08/1	0,21/3,42/1	0,23/3,76/1
	0,003	0,41/6,9/1	0,48/8,06/1	0,55/9,22/1	0,63/10,5/1	0,7/11,62/1
	0,01	1,56/25,3/1	2,09/34,83/1	1,99/33,33/1	2,18/36,33/1	2,36/39,28/1
	0,03	5,04/84,05/1	5,72/95,39/1	6,27/104,6/1	6,85/114,2/1	7,31/121,8/1
1,1	0,001	0,15/2,46/1	0,17/2,84/1	0,19/3,22/1	0,23/3,81/2	0,27/4,56/2
	0,003	0,44/7,3/1	0,52/8,59/1	0,59/9,81/1	0,75/12,4/2	0,74/12,35/1
	0,01	1,89/31,42/1	3,17/52,86/1	2,09/34,84/1	2,29/38,2/1	2,44/40,7/1
	0,03	5,53/92,24/1	6,25/104,16/1	6,67/111,1/1	7,28/121,27/1	7,66/127,7/1

Как следует из табл. 5—7, максимальные относительные погрешности оценки ЭАН достигаются на углероде, т.е. на легких материалах. Исходя из этого и учитывая тот факт, что тяжелые материалы помимо рентгеновских систем могут быть дополнительно обнаружены досмотровыми металлодетекторами, дальнейший процесс оптимизации параметров сэндвич-детекторов целесообразно провести на тестовых материалах в виде взрывчатых веществ (ВВ). При этом для сокращения объемов вычислений ограничимся только максимальными значениями СКО шумов Φ_1 и Φ_2 (когда значение параметра $\sigma_0 = 0,03$), что будет соответствовать в статистическом отношении наименее благоприятному из рассматриваемых вариантов для распознавания материалов.

Наиболее распространенные ВВ, согласно [4], имеют ЭАН, близкий к 7.

В табл. 8 приведены результаты расчетов СКО шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых ОК из материала с ЭАН $Z = 7$ для разных значений параметров H_1 и H_f при $\sigma_0 = 0,03$.

Таблица 6

**Максимальные погрешности оценки эффективного атомного номера
для тестового материала $Z_t = 13$ (алюминий) для разных значений параметров H_1 и H_f**

H_f , мм	σ_0	H_1 , мм				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,001	0,32/2,44/15	0,27/2,08/15	0,26/1,96/15	0,25/1,9/15	0,25/1,923/15
	0,003	0,78/5,99/15	0,66/5,1/15	0,63/4,86/15	0,63/4,87/15	0,63/4,83/15
	0,01	3,44/26,47/15	2,49/19,12/15	2,23/17,2/15	2,25/17,34/0,7	2,61/20,1/0,7
	0,03	9,27/71,29/15	8,39/64,52/15	8,2/61,6/15	7,74/59,6/15	7,82/60,18/0,7
0,5	0,001	0,3/2,34/15	0,26/2,02/15	0,25/1,9/15	0,25/1,9/15	0,25/1,92/15
	0,003	0,75/5,74/15	0,65/4,97/15	0,62/4,8/15	0,62/4,76/15	0,65/4,98/0,7
	0,01	3,24/24,91/15	2,38/18,34/15	2,2/16,9/15	2,5/19,25/0,7	2,77/21,3/0,7
	0,03	9,12/70,18/15	8,27/63,61/15	8,03/61,8/15	7,79/59,93/15	8,2/63,04/0,7
0,7	0,001	0,29/2,27/15	0,26/1,98/15	0,24/1,88/15	0,25/1,9/15	0,25/1,91/15
	0,003	0,72/5,56/15	0,65/4,97/15	0,63/4,82/15	0,63/4,83/0,7	0,68/5,23/0,7
	0,01	3,08/23,67/15	2,24/17,9/15	2,34/18,04/0,7	2,66/20,5/0,7	3,2/23,1/0,7
	0,03	9,01/69,31/15	8,18/62,9/15	7,88/60,6/15	7,9/61,48/0,7	8,4/65,52/0,7
0,9	0,001	0,29/2,21/15	0,25/1,94/15	0,25/1,9/15	0,24/1,9/15	0,25/1,92/15
	0,003	0,71/5,43/15	0,63/4,81/15	0,61/4,7/15	0,66/5,1/0,7	0,72/5,51/0,7
	0,01	2,95/22,68/15	2,29/17,57/0,7	2,6/19,9/0,7	2,81/21,63/0,7	3,19/24,55/0,7
	0,03	8,93/68,66/15	8,1/62,4/15	7,82/60,15/15	8,18/62,93/0,7	8,7/67,01/0,7
1,1	0,001	0,28/2,17/15	0,25/1,91/15	0,25/1,89/15	0,24/1,87/15	0,25/1,91/15
	0,003	0,69/5,32/15	0,62/4,79/15	0,64/4,93/0,7	0,69/5,32/0,7	0,76/5,8/0,7
	0,01	2,84/21,89/15	2,48/19,11/0,7	2,76/21,23/0,7	3,13/24,09/0,7	3,34/25,7/0,7
	0,03	8,86/68,17/15	8,03/61,8/15	8,02/61,7/0,7	8,5/65,2/0,7	8,9/68,5/0,7

Таблица 7

**Максимальные погрешности оценки эффективного атомного номера
для тестового материала $Z_t = 26$ (железо) для разных значений параметров H_1 и H_f**

H_f , мм	σ_0	H_1 , мм				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,001	2,57/9,9/10	1,99/7,64/10	1,74/6,68/10	1,56/5,99/10	1,45/5,57/10
	0,003	4,87/18,72/10	4,25/16,36/10	3,96/15,22/10	3,77/14,5/10	3,63/13,94/10
	0,01	7,81/30,4/10	7,16/27,53/10	6,82/26,45/10	6,62/25,47/10	6,55/25,18/10
	0,03	11,04/42,45/10	10,62/40,83/10	10,42/40,29/10	10,32/39,7/10	10,33/39,73/10
0,5	0,001	2,49/9,58/10	1,92/7,4/10	1,66/6,39/10	1,51/5,8/10	1,42/5,47/10
	0,003	4,78/18,37/10	4,18/16,07/10	3,92/15,6/10	3,7/14,24/10	3,63/13,96/10
	0,01	7,68/29,55/10	7,06/27,16/10	6,74/25,91/10	6,61/25,39/10	6,41/24,64/10
	0,03	10,89/41,89/10	10,51/40,42/10	10,31/39,67/10	10,31/39,65/10	10,16/39,06/10

Окончание табл. 7

0,7	0,001	2,42/9,3/10	1,88/7,22/10	1,63/6,28/10	1,48/5,69/10	1,39/5,34/10
	0,003	4,69/18,05/10	4,17/16,02/10	3,85/14,73/10	3,71/14,26/10	3,54/13,62/10
	0,01	7,57/29,13/10	6,91/26,59/10	6,65/25,57/10	6,46/24,86/10	6,46/24,85/10
	0,03	10,78/41,44/10	10,31/39,67/10	10,16/39,07/10	10,13/38,95/10	10,22/39,32/10
0,9	0,001	2,35/9,04/10	1,82/6,98/10	1,57/6,05/10	1,46/5,6/10	1,37/5,27/10
	0,003	4,62/17,76/10	4,05/15,59/10	3,78/14,54/10	3,63/13,94/10	3,56/13,67/10
	0,01	7,48/28,76/10	6,9/26,56/10	6,65/25,57/10	6,47/24,9/10	6,34/24,37/10
	0,03	10,67/41,03/10	10,33/39,73/10	10,23/39,35/10	10,13/38,95/10	10,07/38,74/10
1,1	0,001	2,29/8,8/10	1,82/7,2/10	1,55/5,94/10	1,44/5,55/10	1,36/5,22/10
	0,003	4,55/17,49/10	3,99/15,38/10	3,79/14,56/10	3,58/13,78/10	3,48/13,39/10
	0,01	7,39/28,43/10	6,83/26,27/10	6,52/25,07/10	6,46/24,86/10	6,38/24,53/10
	0,03	10,59/40,72/10	10,24/39,38/10	10,06/38,69/10	10,1/38,82/10	10,06/38,68/10

Таблица 8

СКО шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых ОК с ЭАН $Z = 7$ для разных значений H_1 и H_f при $\sigma_0 = 0,03$

H_1 , мм	H_f , мм	СКО	$(\rho H)_p$, г/см ²				
			1	2	5	10	20
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04822	0,04454	0,03512	0,0237	0,01089
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05355	0,04951	0,03915	0,02652	0,01226
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05842	0,05404	0,04281	0,02908	0,0135
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0631	0,0584	0,04633	0,03154	0,0147
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06769	0,06268	0,04979	0,03396	0,01587
0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05438	0,05028	0,03977	0,02696	0,01248
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05935	0,05491	0,04352	0,02959	0,01375
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06402	0,05926	0,04703	0,03204	0,01495
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06859	0,06352	0,05047	0,03444	0,01612
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07314	0,06776	0,05389	0,03684	0,01728

Окончание табл. 8

0,3	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06014	0,05565	0,04412	0,03001	0,01396
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0649	0,06008	0,0477	0,03252	0,01518
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06946	0,06434	0,05114	0,03492	0,01635
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,074	0,06856	0,05454	0,0373	0,01752
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07855	0,07279	0,05796	0,03969	0,01868
0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06567	0,0608	0,04829	0,03293	0,01539
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07031	0,06512	0,05178	0,03537	0,01658
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07483	0,06934	0,05518	0,03775	0,01774
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07937	0,07356	0,05859	0,04014	0,01891
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08395	0,07783	0,06203	0,04254	0,02008
0,5	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07106	0,06583	0,05235	0,03578	0,01679
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07564	0,0701	0,0558	0,03819	0,01796
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08018	0,07432	0,0592	0,04058	0,01913
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08474	0,07857	0,06264	0,04297	0,0203
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08937	0,08288	0,06611	0,04541	0,02149

В табл. 9 приведены полученные в результате моделирования значения максимальных относительных погрешностей $(\delta_Z)_{\max}$ (в %) для тестовых ОК с эффективным атомным номером $Z = 7$ для диапазона массовых толщин $(\rho H)_t$ от 1 до 20 г/см² для разных значений параметров H_1 и H_f при $\sigma_0 = 0,03$.

В качестве критерия оптимальности сэндвич-детекторов излучения, на наш взгляд, вполне естественно использовать минимум максимальной относительной погрешности оценки атомного номера исследуемых тестовых ОК (для рассматриваемого диапазона массовых толщин).

Таблица 9

Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{\max}$, (в %) для тестовых ОК с эффективным атомным номером $Z = 7$ для разных значений параметров H_1 и H_f при $\sigma_0 = 0,03$

H_1 , мм	H_f , мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	96,9	91,2	90,7	88,6	86,2
0,2	73,8	74,4	77,2	84,3	89,6
0,3	73,9	79,1	88	91,1	94,2
0,4	83,9	90,3	94	99,2	103,9
0,5	91,5	96,4	100,7	103,7	109,6

Тогда, согласно табл. 9, указанный минимум составит приблизительно 74 %, а соответствующие ему оптимальные значения $H_{1\text{opt}}$ и $H_{f\text{opt}}$ будут равны:

$$H_{1\text{opt}} = 0,2 \text{ мм}, H_{f\text{opt}} = 0,3 \text{ мм или } H_{1\text{opt}} = 0,2 \text{ мм}, H_{f\text{opt}} = 0,5 \text{ мм или } H_{1\text{opt}} = 0,3 \text{ мм}, H_{f\text{opt}} = 0,3 \text{ мм.}$$

Если принять во внимание экономический фактор (минимизация затрат материалов на изготовление сэндвич-детекторов), то предпочтение следует отдать паре:

$$H_{1\text{opt}} = 0,2 \text{ мм}, H_{f\text{opt}} = 0,3 \text{ мм.}$$

Таким образом, предложенный нами алгоритм позволил получить значения параметров сэндвич-детекторов излучения (с заданным материалом первого детектора), которые являются оптимальными при распознавании ВВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен алгоритм оптимизации параметров сэндвич-детекторов излучения по критерию минимума максимальной относительной погрешности оценки эффективного атомного номера материалов объектов контроля методом дуальных энергий, порождаемой квантовой природой излучения. Было проиллюстрировано его использование на конкретном примере для сэндвич-детектора со следующими параметрами: первый (передний) детектор изготовлен из CsI (с преобладающим процессом взаимодействия с излучением в виде фотоэффекта), промежуточный фильтр изготовлен из меди, второй (задний) детектор является детектором полного поглощения. Были получены значения параметров описанного сэндвич-детектора излучения, которые являются оптимальными при оценке эффективного атомного номера взрывчатых веществ. Алгоритм может представлять интерес для разработчиков рентгеновских комплексов с сэндвич-детекторами излучения, что достаточно характерно для систем досмотра багажа, ручной клади пассажиров, почтовых отправок и легкового автотранспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khan S.U., Khan I.U., Ullah I., Saif N., Ullah I. A review of airport dual energy X-ray baggage inspection techniques: image enhancement and noise reduction // Journal of X-ray Science and Technology. 2020. V. 28. No. 3. P. 481—505. <https://doi.org/10.3233/XST-200663>
2. Yalçın O., Reyhancan I.A. Detection of explosive materials in dual-energy X-Ray security systems // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2022. V. 1040. Article ID 167265. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167265>
3. Chang C.H., Ni Y.C., Tseng S.P. Calculation of effective atomic numbers using a rational polynomial approximation method with a dual-energy X-ray // Journal of X-Ray Science and Technology. 2021. V. 29. No. 2. P. 317—330. <https://doi.org/10.3233/xst-200790>

4. *Yim C.W., Hong S.G.* A MCNP simulation for a new dual-energy dual-beam X-ray inspection method using multi-angle Compton scattering to determine the effective atomic number of explosives // *Radiation Physics and Chemistry*. 2022. V. 195. Article ID 110084. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110084>
5. *Duvillier J., Dierick M., Dhaene J., Van Loo D., Masschaele B., Geurts R., Hoorebeke L.V., Boone M.N.* Inline multi-material identification via dual energy radiographic measurements // *NDT & E International*. 2018. V. 94. P. 120—125. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.01.002>
6. *Cordova A.* Technologies for primary screening in aviation security // *Journal of Transportation Security*. 2022. V. 15. No. 3—4. P. 141—159. <https://doi.org/10.1007/s12198-022-00248-8>
7. *Linardatos D., Koukou V., Martini N., Konstantinidis A., Bakas A., Fountos G., Valais I., Michail C.* On the response of a micro non-destructive testing X-ray detector // *Materials*. 2021. 14. P. 888. <https://doi.org/10.3390/ma14040888>
8. *Vukadinovic D., Anderson D.* X-ray baggage screening and AI, EUR 31123 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022. <http://dx.doi.org/10.2760/46363>
9. *Osipov S.P., Udod V.A., Wang Y.* Identification of materials in X-Ray inspections of objects by the dual-energy method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017. V. 53. No. 8. P. 568—587. <https://doi.org/10.1134/S1061830917080058> [*Осипов С.П., Удод В.А., Ван Я.* Распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов // *Дефектоскопия*. 2017. № 8. С. 33—56.]
10. *Kayalvizhi R., Malarvizhi S., Topkar A., Vijayakumar P.* Raw data processing techniques for material classification of objects in dual energy X-ray baggage inspection systems // *Radiation Physics and Chemistry*. 2022. V. 193. Article ID 109512. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109512>
11. *Mamchur D., Peksa J., Le Clainche S., Vinuesa R.* Application and advances in radiographic and novel technologies used for non-intrusive object inspection // *Sensors*. 2022. V. 22. No. 6. Article ID 2121. <https://doi.org/10.3390/s22062121>
12. *Busi M., Kehres J., Khalil M., Olsen U.L.* Effective atomic number and electron density determination using spectral x-ray CT // *Anomaly Detection and Imaging with X-rays (ADIX) IV*. SPIE. 2019. V. 10999. P. 7—17. <https://doi.org/10.1117/12.2519851>
13. *Jumanazarov D., Koo J., Busi M., Poulsen H.F., Olsen U.L., Iovea M.* System-independent material classification through X-ray attenuation decomposition from spectral X-ray CT // *NDT & E International*. 2020. V. 116. P. 102336. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102336>
14. *Iovea M., Neagu M., Dului O.G., Oaie G., Szobotka S., Mateiasi G.* A Dedicated on-board dual-energy computer tomograph // *J. Nondestruct Eval.* 2011. V. 30. P. 164—171. <https://doi.org/10.1007/s10921-011-0104-x>
15. *Smith R.C., Connelly J.M.* CT technologies // *Counterterrorist Detection Techniques of Explosives*. Elsevier, 2022. P. 29—45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64104-5.00009-6>
16. *Alvarez R.E.* Invertibility of the dual energy x-ray data transform // *Medical Physics*. 2019. V. 46. No. 1. P. 93—103. <https://doi.org/10.1002/mp.13255>
17. *Osipov S., Chakhlov S., Udod V., Usachev E., Schetinkin S., Kamysheva E.* Estimation of the effective mass thickness and effective atomic number of the test object material by the dual energy method // *Radiation Physics and Chemistry*. 2020. V. 168. Article ID 108543. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108543>
18. *Zhang Y., Kong W., Li D., Liu X.* On using XMC R-CNN model for contraband detection within X-ray baggage security images // *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. V. 2020. Article ID 1823034. <https://doi.org/10.1155/2020/1823034>
19. *Alvarez R.E.* Analytic models for spectral x-ray imaging. 2019. Preprint. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.12391.09128>
20. *Fredenberg E.* Spectral and dual-energy X-ray imaging for medical applications // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2018. V. 878. P. 74—87. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.07.044>
21. *Zhao S., Pan H., Zhang W., Xia D., Zhao X.* An oblique projection modification technique (OPMT) for fast multispectral CT reconstruction // *Physics in Medicine & Biology*. 2021. V. 66. No. 6. Article ID 065003. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/abe028>
22. *Udod V.A., Osipov S.P., Nazarenko S.Yu.* Algorithm for Evaluating Errors in Recognition of Materials in X-Ray Testing System Containing X-Ray Sandwich Detectors // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022. V. 58. No. 1. P. 46—56. <https://doi.org/10.1134/S1061830922010065> [*Удод В.А., Осипов С.П., Назаренко С.Ю.* Алгоритм оценки погрешностей при распознавании материалов в системе рентгеновского контроля, содержащей сэндвич-детекторы излучения // *Дефектоскопия*. 2022. № 1. С. 40—51.]
23. *Udod V.A., Vorobeichikov S.E., Nazarenko S.Y.* Mathematical models of radiation transparency of test objects when using sandwich X-ray radiation detectors // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 2. P. 161—170. <https://doi.org/10.1134/S1061830920020096> [*Удод В.А., Воробейчиков С.Э., Назаренко С.Ю.* Математические модели радиационных прозрачностей объекта контроля при использовании сэндвич-детекторов рентгеновского излучения // *Дефектоскопия*. 2020. № 2. С. 31—41.]
24. *Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y.* Estimating the influence of quantum noises on the quality of material identification by the dual-energy method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. No. 8. P. 585—600. <https://doi.org/10.1134/S1061830918080077> [*Удод В.А., Осипов С.П., Ван Я.* Оценка вли-

яния квантовых шумов на качество распознавания материалов методом дуальных энергий // Дефектоскопия. 2018. № 8. С. 50—65.]

25. *Slavashevich I., Pozdnyakov D., Kasiuk D., Linev V.* Optimization of physico-topological parameters of dual energy X-ray // Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies: Selected Articles of ISMART2018. 2019. V. 227. P. 262. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21970-3_19

26. *Liang K.J., Sigman J.B., Spell G.P., Strellis D., Chang W., Liu F., Mehta T., Carin L.* Toward automatic threat recognition for airport X-ray baggage screening with deep convolutional object detection // arXiv preprint arXiv:1912.06329. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.06329>

ТРЕХМЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ РАССЕИВАЮЩИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ ЗОНДИРУЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ

© 2023 г. Д.Я. Суханов^{1,*}, А. Халил^{1,**}

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия 634040 Томск, ул. Ленина, 36
E-mail: *sdy@mail.tsu.ru; **atmoon.khalil16@gmail.com*

Поступила в редакцию 25.01.2023; после доработки 16.02.2023
Принята к публикации 17.02.2023

Предлагается метод трехмерной ультразвуковой томографии на основе многостороннего зондирования с множеством излучателей и множеством приемников на цилиндрической поверхности в широкой полосе частот. Излучатели и приемники размещаются на кольце, которое перемещается по вертикальной оси. Обработка сигналов основана на применении согласованной фильтрации и сведена к вычислению циклической свертки по углу и вертикальной оси, что позволяет реализовать быстрый алгоритм восстановления трехмерных изображений. Для проверки метода разработана экспериментальная установка из 32 излучателей и 64 приемников, равномерно размещенных на кольце радиусом 205 мм. В ходе экспериментов осуществлялось зондирование в воздухе на частотах от 38 до 43 кГц. В результате визуализирован трехмерный объект сложной формы, что подтверждает применимость предложенного метода.

Ключевые слова: ультразвуковая томография, MIMO, согласованная фильтрация.

DOI: 10.31857/S0130308223030053, **EDN:** OPDGZN

ВВЕДЕНИЕ

Системы визуализации ближнего действия (ультразвуковые и радиоволновые миллиметрового диапазона) представляют большой интерес для широкого круга приложений, таких как дефектоскопия, безопасность, визуализация скрытых объектов и медицинская диагностика [1—6].

Методы визуализации на основе волнового зондирования (электромагнитного или ультразвукового) позволяют добиться восстановления изображения исследуемого объекта с помощью рассеянного сигнала, и по существу основаны на решении обратной задачи рассеяния волн. Наиболее известными методами реконструкции изображений, основанными на приближении однократного рассеяния, являются миграция во временной области [7], синтез апертуры [6] и метод Столта [8].

Для восстановления рассеивающих и преломляющих неоднородностей применяют другие методы [9], к которым относится трансмиссионная томография. Эти методы основаны на вычислении прямого и обратного распространения волн в итеративном процессе.

В случае моностатического зондирования, в силу теоремы взаимности, задача обнаружения рассеивателей может быть заменена на задачу обнаружения синфазных источников, излучающих на удвоенной частоте, поскольку волна от источника до рассеивателя и от рассеивателя до приемника проходит один и тот же путь [10]. В таком случае, в приближении однократного рассеяния восстановление рассеивателей сводится к вычислению поля обратного распространения на удвоенных частотах. Для ускорения вычислений поля обратного распространения задача решается в области пространственных частот на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). В случае мультистатического плоского однородного зондирования с применением множества излучателей и множества приемников применение БПФ тоже возможно [11].

В данной статье рассматривается зондирующая система с равномерным распределением источников и приемников по круговой апертуре, что позволяет свести задачу восстановления рассеивателей к циклической свертке по углу. Кроме того, за счет однородности измерений по вертикальной оси при сканировании кольцевой апертурой обеспечивается возможность применения свертки по вертикали. В итоге, предложенный метод восстановления трехмерных изображений позволяет ускорить вычисления за счет применения двумерной свертки, которая реализуется через алгоритм быстрого преобразования Фурье. Разработанный метод экспериментально проверен для ультразвуковых волн в воздухе. Но, кроме того, данный подход применим для зондирования в иммерсионной жидкости в целях дефектоскопии и медицинской диагностики или для радиоволнового зондирования в задачах радиотомографии и обнаружения скрытых объектов.

ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧИ УЛЬТРАЗУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ

Рассмотрим томографическую систему, состоящую из множества излучателей и множества приемников, равномерно распределенных по окружности радиуса R в одной плоскости XOY . Эта окружность может смещаться как вверх, так и вниз по оси z (рис. 1).

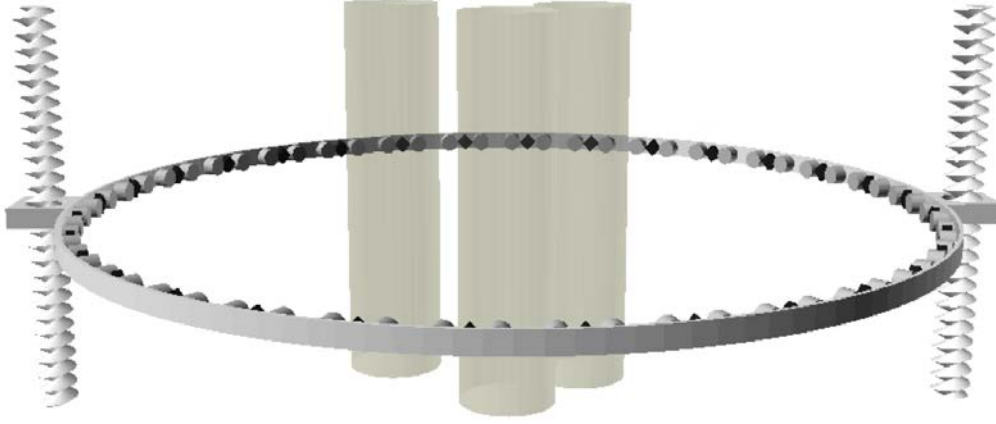


Рис. 1. Рассматриваемая схема системы зондирования на основе множества излучателей и множества приемников, размещенных на окружности: $\blacklozenge$ — излучатели; $\bullet$ — приемники.

Прямую задачу мультистатической системы зондирования в приближении однократного рассеяния можно описать следующим образом:

$$U(\varphi_n, \psi_m, z', k) = \iiint_V \rho(\mathbf{r}) \frac{\exp(ik(|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}| + |\mathbf{T}_n - \mathbf{r}|))}{4\pi|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}||\mathbf{T}_n - \mathbf{r}|} d\mathbf{r}, \quad (1)$$

где $\mathbf{T}_n = (R\cos\varphi_n, R\sin\varphi_n, z')$ — координата n -го излучателя; φ_n — угол, под которым лежит n -й излучатель; $\mathbf{R}_m = (R\cos\psi_m, R\sin\psi_m, z')$ — координата m -го приемника; ψ_m — угол, под которым лежит m -й приемник (рис. 2); $\mathbf{r} = (r\cos\eta, r\sin\eta, z)$ — точка наблюдения; $|\mathbf{T}_n - \mathbf{r}|$ — расстояние между излучателем и точкой наблюдения; $|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}|$ — расстояние между точкой наблюдения и приемником; k — волновое число.

Восстановление изображения рассеивающих неоднородностей (обратную задачу) без учета убывания амплитуды с расстоянием можно осуществить с помощью согласованной фильтрации следующим образом [12]:

$$\hat{\rho}(\mathbf{r}) = \int \int \sum_{k, z'} \sum_n \sum_m U(\varphi_n, \psi_m, z', k) \exp(-ik(|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}| + |\mathbf{T}_n - \mathbf{r}|)) dz' dk = \int \rho(r, \eta, z, k) dk, \quad (2)$$

где

$$\rho(r, \eta, z, k) = \int \sum_{z'} \sum_n \sum_m U(\varphi_n, \psi_m, z', k) \exp(-ik(|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}| + |\mathbf{T}_n - \mathbf{r}|)) dz' dk. \quad (3)$$

Перейдем от рассмотрения дискретного множества излучателей и приемников к непрерывному представлению и заменим суммирование в (3) на интегрирование.

Можно переписать расстояния $|\mathbf{T}_n - \mathbf{r}|$ и $|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}|$ следующим образом:

$$|\mathbf{T}_n - \mathbf{r}| = \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\varphi_n - \eta) + (z' - z)^2},$$

$$|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}| = \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\psi_m - \eta) + (z' - z)^2}.$$

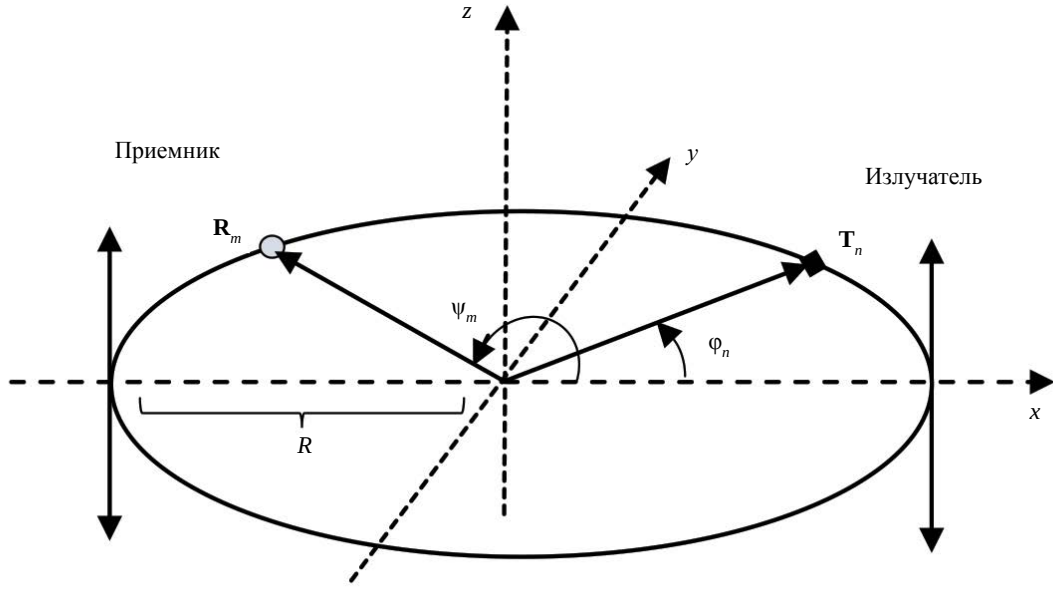


Рис. 2. Схема мультистатистического зондирования с цилиндрической апертурой.

Подставляя эти два соотношения в уравнение (3), получим:

$$\rho(r, \eta, z, k) = \iiint_{\varphi_n, \psi_m, z'} U(\varphi_n, \psi_m, z', k) E_1(r, \psi_m - \eta, z' - z) E_2(r, \varphi_n - \eta, z' - z) dz' d\psi_m d\varphi_n, \quad (4)$$

где

$$E_1(r, \psi_m - \eta, z' - z) = \exp\left(-ik\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr\cos(\psi_m - \eta) + (z' - z)^2}\right),$$

$$E_2(r, \varphi_n - \eta, z' - z) = \exp\left(-ik\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr\cos(\varphi_n - \eta) + (z' - z)^2}\right).$$

Применим двумерное преобразование Фурье к уравнению (4) по z и η следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{P}(r, \kappa_\eta, \kappa_z, k) &= \iiint_{\varphi_n, \psi_m, z'} U(\varphi_n, \psi_m, z', k), \\ &\left(\iint_{\eta, z} E_1(\psi_m - \eta, z' - z) E_2(\varphi_n - \eta, z' - z) \exp(i\kappa_\eta \eta) \exp(i\kappa_z z) d\eta dz \right) dz' d\varphi_n d\psi_m. \end{aligned} \quad (5)$$

Заменим переменные в предыдущем уравнении в соответствии с выражениями $\psi_m - \eta = \Phi$, $z' - z = Z$, $\varphi_n - \psi_m = \Delta\varphi$. После алгебраических преобразований выражение (5) примет вид:

$$\tilde{P}(r, \kappa_\eta, \kappa_z, k) = - \int_{\Delta\varphi} \tilde{U}(\Delta\varphi, k, \kappa_\eta, \kappa_z) \tilde{Q}(r, k, \Delta\varphi, -\kappa_\eta, -\kappa_z) d\Delta\varphi, \quad (6)$$

где

$$\tilde{U}(\Delta\varphi, k, \kappa_\eta, \kappa_z) = \iint_{\psi_m, z} U(\Delta\varphi, \psi_m, z', k) \exp(i\kappa_\eta \varphi_m) \exp(i\kappa_z z) dz d\psi_m,$$

$$\begin{aligned}\tilde{Q}(r, k, \Delta\varphi, -\kappa_\eta, -\kappa_z) &= \iint_{\varphi, Z} E_1(r, k, \Phi, Z) E_2(r, k, \Delta\varphi + \Phi, Z) \exp(-i\kappa_\eta \Phi) \exp(-i\kappa_z Z) d\varphi dZ = \\ &= \iint_{\varphi, Z} Q(r, k, \Delta\varphi, \Phi, Z) \exp(-i\kappa_\eta \Phi) \exp(-i\kappa_z Z) d\varphi dZ.\end{aligned}$$

Применим двумерное обратное преобразование Фурье к уравнению (6) по κ_z и κ_η и проинтегрируем по k следующим образом:

$$\begin{aligned}\hat{\rho}(r, \eta, z) &= \int_k \left(\iint_{\kappa_\eta, \kappa_z} \tilde{P}(r, \kappa_\eta, \kappa_z, k) \exp(-i\kappa_\eta \varphi) \exp(-i\kappa_z z) d\kappa_\eta d\kappa_z \right) dk = \\ &= - \int_k \int_{\Delta\varphi} \left(\iint_{\kappa_\eta, \kappa_z} \tilde{U}(\Delta\varphi, k, \kappa_\eta, \kappa_z) \tilde{Q}(r, k, \Delta\varphi, -\kappa_\eta, -\kappa_z) \exp(-i\kappa_\eta \varphi) \exp(-i\kappa_z z) d\kappa_\eta d\kappa_z \right) d\Delta\varphi dk\end{aligned}$$

или

$$\hat{\rho}(r, \eta, z) = - \int_k \int_{\Delta\varphi} \left(IFT_{2D} \left[FT_{2D} \left(U(\Delta\varphi, \psi_m, z', k) \right) \cdot FT_{2D} \left(Q(r, k, \Delta\varphi, \Phi, Z) \right) \right] \right) d\Delta\varphi dk, \quad (7)$$

где $FT_{2D}(\cdot)$ — двумерное преобразование Фурье; $IFT_{2D}(\cdot)$ — двумерное обратное преобразование Фурье.

Таким образом, трехмерное изображение рассеивающих неоднородностей можно восстановить с помощью множества двумерных преобразований Фурье, а, значит, ускорить процесс восстановления. Остается интегрирование для различных частот и различных разностей угловых положений излучателей и приемников, но такой объем вычислений приемлем для современных компьютеров.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Рассмотрим широкополосную систему зондирования из 32 излучателей и 64 приемников, которые размещаются равномерно по окружности радиуса $R = 205$ мм в одной плоскости XOY и двигаются вверх и вниз по оси z с шагом 3,5 мм. Применим зондирующий ультразвуковой широкополосный сигнал в полосе частот от 38 до 43 кГц. Скорость звука предполагается равной 342 м/с.

Было проведено моделирование для визуализации четырех точечных рассеивателя в разных координатах: первый — (0, -100, 120) мм; второй — (0, 100, 150) мм; третий — (-100, 0, 40) мм; четвертый — (100, 0, 120) мм. Изображение рассеивающих объектов восстановлено предложенным методом (рис. 3). Для заполнения апертуры однородным множеством точек по углу, данные были дополнены нулями до 128 приемников и 128 излучателей. На реконструированном изображении можно видеть наличие четырех точек в позициях, совпадающих с размещением рассеивателей. Наблюдаются артефакты, связанные с разреженным размещением датчиков.

Разрешающая способность системы в плоскости (x, y) определяется половиной длины волны $(\lambda/2)$ самой высокочастотной компоненты сигнала, а разрешение в центре системы по вертикали

Δz зависит от соотношения высоты H и радиуса зондирующей системы: $\Delta z = \frac{R\lambda}{H}$. Простран-

ственное разрешение по оси z хуже, так как размер апертуры по вертикали H сравним с радиусом кольца R , т.е. $\Delta z \approx \lambda$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для экспериментальной проверки системы визуализации с множеством излучателей и множеством приемников была разработана экспериментальная установка на основе микроконтроллера STM32F407, который использовался для генерирования зондирующих сигналов и для оцифровки принятых рассеянных сигналов. Зондирование проводилось в воздухе линейно-частотно модулированным сигналом в диапазоне частот от 38 до 43 кГц. Для излучения и приема применялись пьезокерамические сенсоры Murata MA40S4R/S. В микроконтроллер STM32F407 имеется

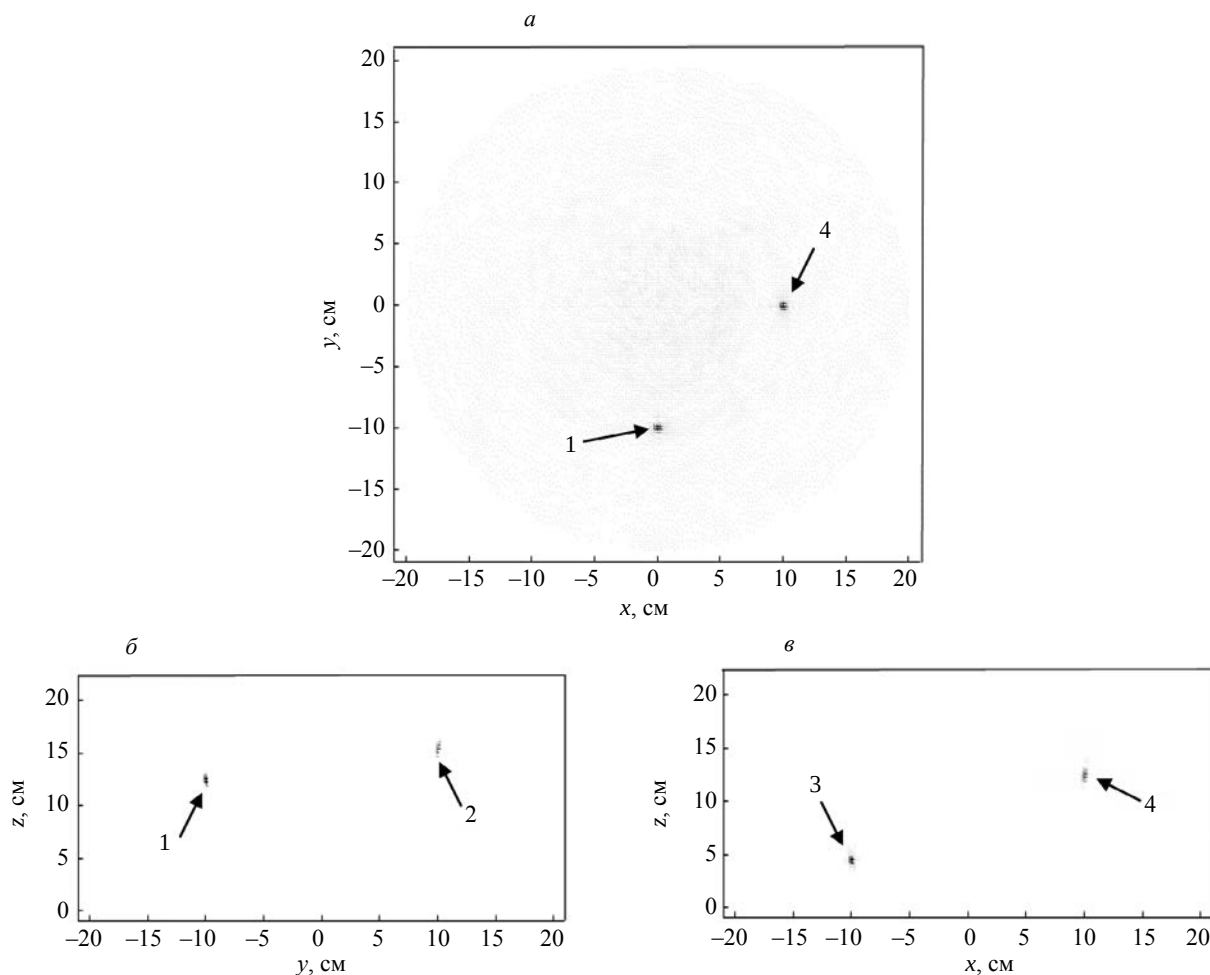


Рис. 3. Восстановленное изображение точечных рассеивателей по данным численного моделирования:
 а — проекция XOY при $z = 120$ мм; б — проекция YOZ при $x = 0$ мм; в — проекция XOZ при $y = 0$ мм.

два цифроаналоговых преобразователя (ЦАП). Каждый канал ЦАП подключался к 16-канальным мультиплексорам 74НС4067, что в итоге обеспечило 32 канала передачи, которые активируются по очереди. Прием сигналов осуществлялся с помощью восьми аналого-цифровых преобразователей (АЦП) микроконтроллера STM32F407, которые подключались к восьми 16-канальным мультиплексорам 74НС4067 для обеспечения 64 приемных каналов. Переключение мультиплексоров приемного тракта синхронизировано с работой АЦП, что позволило почти одновременно оцифровывать сигналы с 64 каналов. Передача данных в компьютер проводилась по интерфейсу Ethernet, протокол UDP.

Зондирующая система состоит из 32 излучателей, равномерно расположенных по окружности радиусом $R = 205$ мм и углом размещения $\varphi_n = \left(n + \frac{1}{4}\right) \frac{2\pi}{32}$, и 64 приемников, которые равномерно размещаются по той же окружности с углом $\psi_m = m \frac{2\pi}{64}$. Эта окружность перемещается по оси z с

помощью двух шаговых двигателей (рис. 4). При движении эта окружность описывает виртуальный цилиндр, в котором размещается исследуемый объект. Количество шагов по оси z равно 64, длина шага равна 3,5 мм. Процесс сканирования занимает 317 с, включая измерение отраженных сигналов и движение окружности по оси z , а процесс восстановления изображения с помощью параллельного программирования занимает 180 с.

Разработанный метод рассчитан на визуализацию рассеивающих неоднородностей и применим для восстановления изображения внешнего контура исследуемых объектов. Был проведен

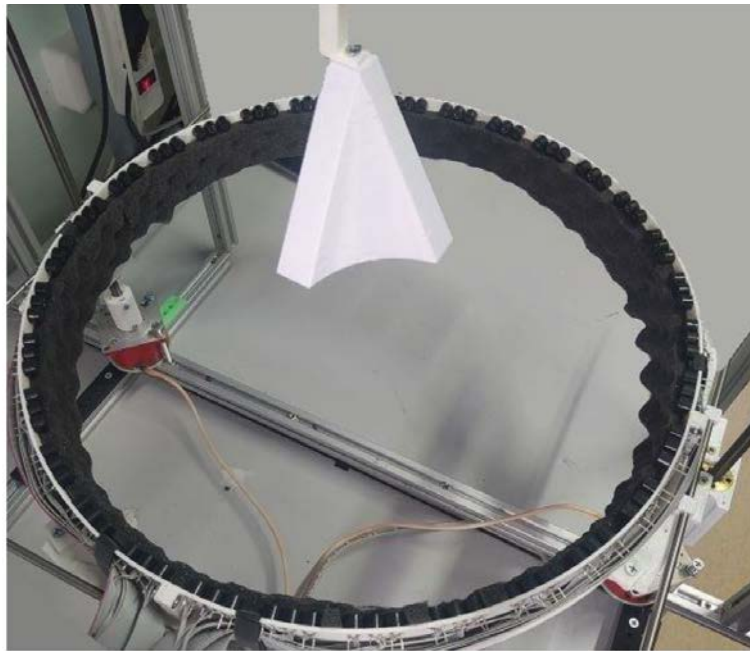


Рис. 4. Фото эксперимента по ультразвуковому зондированию тестового объекта, расположенного внутри цилиндра.

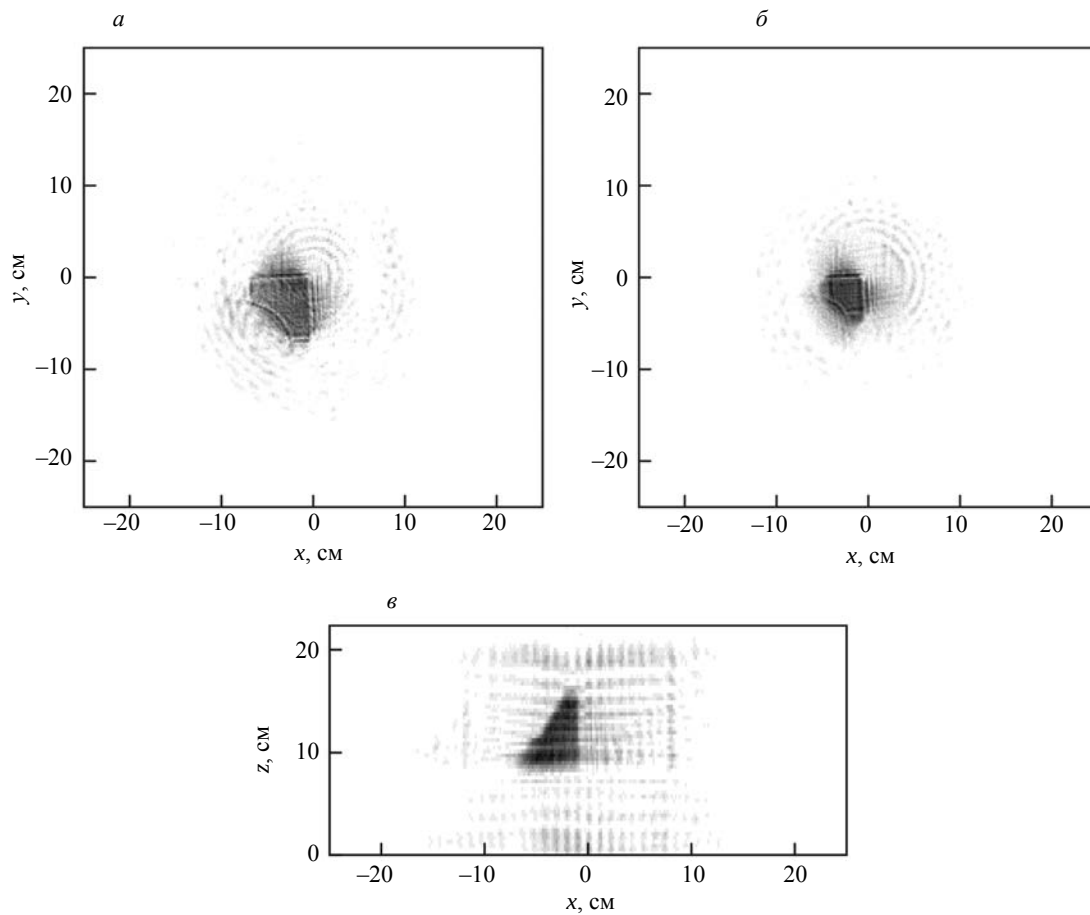


Рис. 5. Плоские сечения восстановленного трехмерного изображения:
 a — в плоскости XOY при $z = 10$ см; b — при $z = 13$ см; c — плоскость XOZ при $y = 0$ см.

эксперимент для визуализации пластикового объекта из полилактида — ПЛА (см. рис. 4). Плотность ПЛА составляет 1240 кг/м^3 , скорость звука в этом материале 2246 м/с . Поскольку контраст ПЛА с воздушной средой слишком велик, то почти все падающие ультразвуковые волны отражаются от поверхности. При обработке из измеренных данных вычитались фоновые сигналы, которые были измерены при отсутствии тестового объекта. Было восстановлено трехмерное изображение по формуле (7). Восстановленное изображение показано в разных проекциях на рис. 5.

Можно видеть, что изображение объекта восстановлено. По сути, оно состоит из двух изображений: восстановленного по отраженным волнам и восстановленного по прошедшим на просвет волнам. За счет отраженных волн визуализируются резкие контуры объекта, а за счет проходящих волн получено теневое изображение всего объекта в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод трехмерной ультразвуковой томографии на основе мультистатистического зондирования с цилиндрической поверхности. Излучатели и приемники равномерно размещаются на кольце, которое перемещается по вертикальной оси. Предложен быстрый алгоритм восстановления трехмерных изображений на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье. Разработана экспериментальная установка из 32 излучателей и 64 приемников для воздушной среды, работающая в диапазоне частот от 38 до 43 кГц. Численное моделирование и эксперименты подтвердили возможность получения трехмерных изображений рассеивающих объектов предложенным методом.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0038.

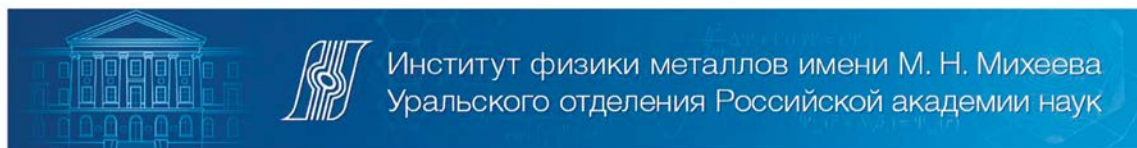
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sheen D.M., McMakin D.L., Hall T.E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2001. V. 49. No. 9. P. 1581—1592.
2. Zhuge X., Yarovoy A.G. Three-dimensional near-field MIMO array imaging using range migration techniques // IEEE Trans. Image Process. 2012. V. 21. No. 6. P. 3026—3033.
3. Li J., Stoica P. MIMO Radar Signal Processing. Hoboken, N.-J.: Wiley-IEEE Press, 2008. P. 472.
4. Dolmatov D.O., Ermoshin N.I., Koneva D.A., Sednev D. A. Application of Nonuniform Fourier Transform to Solving Ultrasonic Tomography Problems with Antenna Arrays // Russ. J. Nondestruct. Test. 2020. V. 56. P. 603—610.
5. Суханов Д.Я., Халил А. Получение трехмерных акустических изображений на основе широкополосного зондирования системой из множества излучателей и множества приемников // Радиотехника. 2022. № 12. С. 137—146.
6. Суханов Д.Я., Халил А. Волновая зондирующая система с оптимальной взаимной ориентацией решетки излучателей и решетки приемников для визуализации рассеивающих объектов // Техника радиосвязи. 2022. № 3. С. 62—70.
7. Goldsmith P.F., Hsieh C., Huguenin G.R., Kapitzky J., Moore E.L. Focal plane imaging systems for millimeter wavelengths // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1993. V. 41. No. 10. P. 1664—1675.
8. Stolt R. Migration by Fourier transform techniques // Geophys. 1978. V. 43. No. 1. P. 23—48.
9. Bazulin E.G., Goncharsky A.V., Romanov S.Ya., Seryozhnikov S. Yu. Inverse Problems of Ultrasonic Tomography in Nondestructive Testing: Mathematical Methods and Experiment // Russ. J. Nondestruct. Test. 2019. V. 55. P. 453—462.
10. Lopez-Sanchez J.M., Fortuny-Guash J. 3-D radar imaging using range migration techniques // IEEE Trans. Antennas. Propag. 2000. V. 48. No. 5. P. 728—737.
11. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом контроле двойного сканирования для повышения качества изображения рассеивателей // Акустический журнал. 2001. Т. 47. № 6. С. 741—745.
12. Khalil A. Implementation of Ultrasonic Tomography of Scatterers Based on a Circular Array / 2022 International Siberian Conference on Control and Communications. Tomsk, Russian Federation. 2022. P. 1—4.

XXXIV Уральская конференция с международным участием «ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ЯНУСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ)»

20—21 апреля 2023 г.

г. Пермь



Партнеры



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



УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем Вас принять участие в **XXXIV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)»**, которая пройдет **20-21 апреля 2023 г.** в Перми в рамках **Уральского Форума сварки и контроля** на базе ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Формат проведения – **очный**. Язык: **русский, английский**.

РАЗДЕЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

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

Во второй день конференции **21 апреля 2023 г.** будет проходить **молодежная секция**, участниками которой могут стать студенты профильных кафедр, аспиранты, молодые специалисты и ученые (возраст участников — до 35 лет включительно).

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ОРГКОМИТЕТА

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

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ КОНФЕРЕНЦИИ

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

РУКОВОДИТЕЛЬ МОЛОДЕЖНОЙ СЕКЦИИ

Мушников А.Н., к.т.н., ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург

ЧЛЕНЫ ОРГКОМИТЕТА

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

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

Велько Н.А., ЗАО «ЗУАЦ», г. Пермь

Кинжагулов И.Ю., к.т.н., учреждение науки «ИКЦ СЭКТ», г. Санкт-Петербург

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

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

Крёнинг Х.-М.В., профессор, Саарский университет, г. Саарбрюкен, Германия

Петров А.Ю., к.т.н., РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Москва

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

Ринкевич А.Б., член-корр. РАН, д.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

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

Сташков А.Н., к.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

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

Участие в конференции — **бесплатное**. Проживание и трансфер бронируются и оплачиваются самостоятельно участниками конференции.

ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДОКЛАДОВ

- устный доклад (очный);
- стендовый доклад (очный).

ТРЕБОВАНИЯ К УСТНЫМ ДОКЛАДАМ

Продолжительность не должна превышать **10 минут** (7 минут доклад + 3 минуты дискуссия), доклад должен сопровождаться компьютерной презентацией (файл *.ppt), скопированной на компьютер оргкомитета **заранее**.

ТРЕБОВАНИЯ К СТЕНДОВЫМ ДОКЛАДАМ

Рекомендуемые размеры стендовой презентации: ширина 100 см, высота — 120 см. Монтаж стендовой презентации на стендовой панели с помощью скотча. О времени размещения материалов стендовых докладов будет сообщено дополнительно.

Материалы стендового доклада должны содержать: заголовок — название исследования; ФИО автора (а также научного руководителя для докладов молодежной секции), название учреждения, где выполнено исследование; цель исследования; задачи и методику исследования (очень кратко); результаты в виде графиков и/или диаграмм, фото; выводы.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕЗИСОВ

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

Тезисы и заявки для участия в конференции принимаются по e-mail: **fmnk-conf@mail.ru**. При отправке тезисов просим указывать секцию (основная или молодежная), тип доклада (устный или стендовый), должность и номер телефона.

В тезисах на молодежную секцию дополнительно должны быть указаны Ф.И.О. и должность научного руководителя.

Тезисы будут опубликованы на сайте журнала «Дефектоскопия»: <http://defectoskopiya.ru>. Обращаем Ваше внимание, что для публикации тезисов необходимо до 10 апреля 2022 г. прислать копию экспертного заключения о возможности опубликования материалов в открытой печати (согласно шаблону вашей организации)!

ВАЖНЫЕ ДАТЫ

Регистрация до **1 марта 2023 г.**

Прием тезисов до **19 марта 2023 г.**

Прием экспертных заключений до **10 апреля 2023 г.**

КОНТАКТЫ

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

Тел. (343) 378-36-18; факс (343) 374-52-44 (с пометкой «Оргкомитет ФМНК-34 Михайлову Алексею Вадимовичу»).

e-mail: **fmnk-conf@mail.ru**

С уважением и надеждой на Ваше участие в **ФМНК-34**
Оргкомитет ФМНК-34



Уважаемые друзья и коллеги, 10 февраля 2023 года ушел из жизни наш учитель, научный руководитель ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана», заведующий кафедрой «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана, президент Национального агентства контроля сварки (НАКС), член редколлегии журнала «Дефектоскопия», академик РАН **Алешин Николай Павлович**.

Николай Павлович прошел путь от простого выпускника-инженера МВТУ им. Н.Э. Баумана до академика РАН. Его профессиональный путь начался с кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства», где он продолжил дело своего наставника академика Г.А. Николаева. С 1989 г. по настоящее время Николай Павлович возглавлял кафедру «Машины и автоматизация сварочного производства» («Оборудование и технология сварочного производства») МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В 1994 году Приказом Минобразования РФ одновременно с руководством кафедры в МГТУ Н.П. Алешин назначен директором Научно-учебного центра «Сварка и контроль». Длительное время он — руководитель Управляющего совета по неразрушающему контролю Госстандарта РФ, член бюро Межгосударственного совета СНГ по сварке и родственным технологиям, заместитель председателя Национального комитета по сварке, председатель диссертационного совета при МГТУ им. Н.Э. Баумана. В 2000 году Николай Павлович стал член-корреспондентом, а в 2006 году был избран академиком Российской академии наук. Н.П. Алешин был инициатором и вдохновителем разработки системы независимой от работодателя аттестации персонала сварочного производства и создания «Национального Агентства Контроля Сварки» (НАКС), бессменным президентом которого являлся с 1992 г.

Алешин Н.П. разработал новые технологии сварки металлов, сплавов и композиционных материалов, а также математические модели и трехконтурные автоматизированные системы для сварки плавлением. Создал теорию дифракции упругих волн в твердотельном приближении для коротковолновых отражателей, отмеченную Международной премией неразрушающего контроля. Сформулировал физическую модель и дал математическое описание акусто-сварочной модели крупнозернистых материалов. Им также был предложен и реализован метод решения задачи рассеяния акустического поля на групповых отражателях (метод вынесенных источников).

Под руководством Н.П. Алешина созданы автоматизированные ультразвуковые диагностические комплексы типа «АВТОКОН-МГТУ» с контактным и бесконтактным вводом упругих колебаний для оценки технического состояния сварных соединений и основного металла магистральных газо- и нефтепроводов при их сооружении, реконструкции и ремонте, широко применяемые на объектах газотранспортной системы Газпрома. Разработаны портативные ультразвуковые мультипрограммные дефектоскопы-томографы типа СК-РДМ, обеспечивающие в процессе контроля, слежение и регистрацию качества акустического контакта и объемов проконтролированного металла, автоматизированные системы активного управления сварочными процессами, теория свариваемости и новые технологии сварки современных сварочных материалов и наплавки композиционных материалов в защитных газах и в вакууме. Под его руководством и непосредственном участии созданы и внедрены автоматизированные робот-сканеры с фазированными решетками. Впервые разработан и реализован амплитудно-дифракционный метод, обеспечивающий практически 100 % выявление дефектов.

Достижения Н.П. Алешина не раз были отмечены на федеральном и международном уровне. Ученый был лауреатом премии Совмина СССР, Международной премии «Рентген-Соколов», четыре раза — лауреатом премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, награжден орденом Дружбы, орденом Почета и орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени.

При непосредственном участии Н.П. Алешина были воспитаны тысячи инженеров, произошло становление сотен видных ученых в области сварки и неразрушающего контроля. Мы, его ученики и соратники, сохраним светлую память о выдающемся Учене и Человеке!

Коллеги