

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
 Основан в феврале 1965 года
 Екатеринбург

№ 12
2021

СОДЕРЖАНИЕ**Акустические методы**

- А.А. Марков, Е.А. Максимова, А.Г. Антипов.** Динамическая коррекция чувствительности дефектоскопических каналов при высокоскоростном контроле рельсов 3
- В.К. Качанов, И.В. Соколов, Р.В. Концов, М.Б. Федоров, В.В. Первушин.** Ультразвуковой адаптивный томограф бетонных изделий с нестандартной конфигурацией 15
- Д.А. Дерусова, В.П. Вавилов, В.О. Нехорошев, В.Ю. Шпильной, Н.В. Дружинин.** Особенности лазерно-виброметрического неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов с использованием воздушно-связанных ультразвуковых преобразователей 26

Электромагнитные методы

- А.В. Бызов, Д.Г. Ксенофонтов, В.Н. Костин, О.Н. Василенко.** Селективный магнитный контроль толщины и степени упрочнения поверхностных слоев на стальных объектах 39
- А.В. Никитин, А.В. Михайлов, А.С. Петров, С.Э. Попов.** Методика практического восстановления параметров формы поверхностных двумерных дефектов с учетом нелинейных свойств ферромагнетика 46
- М.Б. Ригмант, Н.В. Казанцева, А.В. Кочнев, Ю.Н. Коэмец, Ю.В. Корх, М.К. Корх, М.С. Карабаналов.** Выявление магнитной анизотропии в аустенитной хромоникелевой стали после прокатки 56

Тепловые методы

- С.Е. Черных, В.Н. Костин, Ю.И. Комоликов.** Исследование поверхностного окисления циркония активным тепловым методом 63
- Информация 71

ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ КАНАЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ КОНТРОЛЕ РЕЛЬСОВ

© 2021 г. А.А. Марков^{1,*}, Е.А. Максимова¹, А.Г. Антипов²

¹АО «Радиоавионика», Россия 190005 Санкт-Петербург, Троицкий пр., 4Б

²Санкт-Петербургский государственный университет, Россия 199034 Санкт-Петербург,
Университетская наб., 7/9

*E-mail: amarkovspb@gmail.com

Поступила в редакцию 30.09.2021; после доработки 09.11.2021

Принята к публикации 12.11.2021

Рассмотрено повышение достоверности высокоскоростного ультразвукового контроля длинномерных объектов, в частности железнодорожных рельсов. Показано, что действующие нормативные документы не учитывают особенности высокоскоростного контроля рельсов, ориентированы на соблюдение первоначально заданных параметров и не могут обеспечить требуемую достоверность обнаружения дефектов. Рассмотрены факторы, проявляющиеся при больших скоростях сканирования и негативно влияющие на качество контроля. Большинство этих факторов не поддаются количественной оценке для их учета и корректировки параметров контроля. Выполнена оценка возможной недобраковки дефектов при работе по действующим требованиям.

Для обеспечения более надежного контроля в непрогнозируемых и динамичных условиях высоких скоростей сканирования предложено оценивать текущую чувствительность контроля путем анализа сигналов от типовых конструктивных отражателей контролируемого объекта. В качестве таких отражателей при контроле рельсов возможно использовать типовые отверстия в зоне болтовых стыков, регулярно встречающихся по пути сканирования. Получено выражение для определения величины коррекции чувствительности контроля с учетом скорости сканирования и измеряемых параметров сигналов от отверстий. Предложен алгоритм динамической корректировки чувствительности контроля, повышающий достоверность обнаружения дефектов в условиях высокоскоростного сканирования.

Ключевые слова: рельсовая дефектоскопия, высокоскоростной контроль, условные размеры дефекта, чувствительность, болтовые отверстия, негативные факторы, динамическая коррекция.

DOI: 10.31857/S0130308221120010

1. ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ

Сплошной контроль рельсов осуществляется передвигаемыми операторами дефектоскопными тележками (со скоростью перемещения V до 5 км/ч), вагонами-дефектоскопами (до 60—80 км/ч) и высокоскоростными (до 120 км/ч) дефектоскопическими комплексами [1—5].

При контактном способе ввода ультразвуковых (УЗ) колебаний в металл рельсов на высоких (60—120 км/ч) скоростях сканирования проявляются разнообразные факторы, негативно влияющие на качество контроля [6]: нестабильность акустического контакта; отличие температуры контролируемых рельсов от той, при которой проводилась настройка [7—9]; состояние поверхности катания и поверхностных слоев рельсов [10]; износ протекторов (доньшек) УЗ преобразователей (ПЭП); компрессия условных размеров отражателей [6, 11].

При одновременном воздействии нескольких факторов некоторые из них могут взаимно компенсировать друг друга, а суммарное воздействие других может привести к полной потере контроля. Например, при уменьшении толщины протектора ПЭП в процессе проезда (от 4,0 до 0,2 мм) и снижении температуры окружающего воздуха (и рельсов) чувствительность контроля возрастает. При увеличении скорости сканирования чувствительность уменьшается, взаимно компенсируя изменение общей чувствительности контроля. С другой стороны, одновременное воздействие даже двух факторов: повышение температуры воздуха (от 0° до 40°С) и увеличение скорости сканирования от 20 до 100 км/ч может вызвать уменьшение амплитуды сигналов и сокращение зоны локации (условной протяженности ΔL) отражателей более чем на 20 % [11], что может суммарно привести к недобраковке (пропуску) сигналов от опасного дефекта.

Таким образом, значения измеряемых параметров от искомых дефектов зависят от многих разнообразных факторов. Оценка количественного вклада каждого фактора на конечный результат (на достоверность и надежность контроля) требует проведения сложных экспериментальных исследований и не всегда корректно выполнимо. В то же время, достоверность контроля рельсов средствами дефектоскопии во многом зависит от соблюдения заданных

параметров в процессе контроля. Естественно, в широком диапазоне скоростей контроля эксплуатирующихся рельсов (5—120 км/ч) обеспечить необходимую стабильность и эффективность дефектоскопирования с первоначально установленными параметрами контроля маловероятно.

Актуальность достижения и сохранения требуемой достоверности контроля рельсов многократно возрастает в связи с принятой в мире тенденцией перехода от низкопроизводительных дефектоскопных тележек на скоростные (до 80 км/ч) и высокоскоростные (до 120 км/ч) диагностические комплексы [3, 5, 12]. Поэтому исследования, направленные на разработку технологии динамической корректировки параметров (чувствительности) ультразвукового контроля с учетом воздействующих при высокоскоростном контроле факторов, являются своевременными.

2. АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ КОЛИЧЕСТВА ВЫЯВЛЯЕМЫХ ДЕФЕКТОВ И ИХ УСЛОВНЫХ РАЗМЕРОВ ОТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНТРОЛЯ

Условная протяженность пачек эхосигналов ΔL (ГОСТ 18576—96) при анализе дефектограмм многоканального УЗ контроля длинномерных изделий является простым и информативным параметром отражателей (дефектов). Размеры пачек сигналов позволяют оператору практически мгновенно (визуально) отделить полезные сигналы от конструктивных отражателей и дефектов в рельсах от всевозможных помех УЗ контроля, а также оценить степень развития (размер) дефектов. В рельсовой дефектоскопии браковочные признаки сигналов также ориентированы на оценку условной протяженности ΔL , а не максимальной амплитуды искомых дефектов [13—15].

Оценка сигналов путем измерения *условных размеров выявляемых дефектов*, а не их *амплитуд*, как это принято при ручном контроле, имеет теоретическое обоснование. Еще в 1966 г. И.Н. Ермолов показал, что при контроле изделий наклонными ПЭП основными характеристиками обнаруживаемых дефектов должны являться условные размеры, а амплитуда — дополнительным параметром [16]. Особенно это важно при контроле изделий ограниченных размеров (например, рельсов), когда на формируемую амплитуду эхосигнала большое значение оказывает соотношение фаз лучей, отраженных непосредственно от плоскости дефекта, и лучей, переотраженных от поверхностей изделия и дефекта. Амплитуды эхосигналов от идентичных дефектов могут отличаться в несколько раз в зависимости от глубины их расположения относительно поверхности изделия. В исследованиях В.Г. Щербинского [8] и А.К. Гурвича [9] показано, что условные размеры дефектов при абсолютном способе оценки монотонно увеличиваются с возрастанием истинных размеров дефектов, что способствует более достоверной экспресс-оценке сигналов при визуальном анализе.

Ниже приведены результаты исследований зависимости условных размеров и выявляемости реальных дефектов рельсов при изменении чувствительности контроля.

Выявляемость опасных дефектов рельсов в зависимости от чувствительности контроля (порога регистрации сигналов) оценена с помощью базы данных Центра расшифровки Октябрьской ж/д. Анализировали дефектограммы вагонов-дефектоскопов, полученных на участках смешанного пассажирского и грузового движения при скоростях сканирования 35—45 км/ч. Измерены пачки сигналов (с наибольшими значениями характеристик¹) от 50 реальных дефектов, в основном, в виде поперечных трещин в головке рельсов при их озвучивании наклонными ПЭП с углами ввода 70 и 58°. Построена зависимость количества Q выявляемых дефектов (в % от 50 шт. дефектов) при разных амплитудных порогах регистрации $N_1 \dots N_8$ с дискретностью 3 дБ (рис. 1). Оказалось, что уменьшение чувствительности контроля на 15 дБ может привести к пропуску почти 80 % рассматриваемых дефектов. При дальнейшем снижении чувствительности еще на 6 дБ, только три из 50 дефектов были зарегистрированы.

Отображенная на этом же рисунке усредненная условная протяженность пачек сигналов от анализируемых дефектов $\Delta L_{\text{ср}}$ в зависимости от уровня чувствительности показывает, что, в основном, снижение выявляемости дефектов происходит именно из-за уменьшения зоны локации. По действующей НТД («Положение о расшифровке результатов неразрушающего контроля рельсов», утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 09.01.2018 г. № ЦДИ-1/р) пачки сигналов от отражателей в

¹Обычно дефект может быть зафиксирован несколькими каналами и с нескольких ракурсов, в том числе т.н. «наезжающими» и «отъезжающими» ПЭП [4].

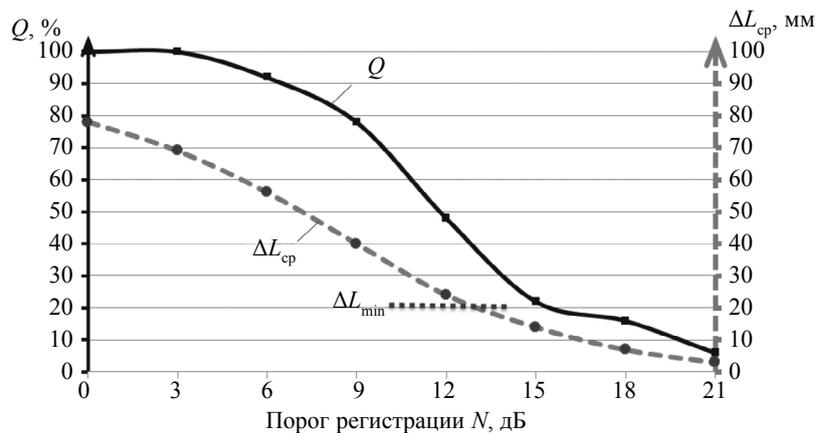


Рис. 1. Влияние уменьшения чувствительности контроля на количество Q выявленных дефектов и их усредненный условный размер $\Delta L_{\text{ср}}$.

рельсах с малым значением условного размера $\Delta L < 20$ мм (на графике — штриховая линия ΔL_{min}) операторами по расшифровке могут не рассматриваться.

Таким образом, приведенные результаты (см. рис. 1) показывают, что даже при небольших скоростях сканирования (около 40 км/ч) из-за воздействия неизбежных в реальных условиях негативных факторов изменение чувствительности контроля на 12—15 дБ может привести к пропуску (недобраковке) значительного количества опасных дефектов. В связи с этим важно разработать технологию отслеживания в текущий момент времени реальной чувствительности контроля и ее оперативной корректировки при действии негативных факторов.

Принципы формирования сигналов от рассмотренных дефектов в головке рельсов и анализируемых в работе отражателей в шейке практически идентичны, т.к. эхосигналы от них появляются примерно в одинаковой временной зоне (в районе 60—110 мкс). Это вызвано тем, что дефекты в головке, в основном, выявляются однократно отраженным лучом, а дефекты и отражатели в шейке рельсов — прямым лучом.

3. ПРЕДЛАГАЕМАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОРРЕКЦИИ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ

3.1. Основная идея предлагаемой технологии

Даже приближенная оценка влияния некоторых факторов на измеряемый параметр ΔL показывает, что при соблюдении действующей технологии с сохранением предварительной настройки каналов при высокоскоростном сканировании можно ожидать значительные отклонения от первоначальных значений, которые могут привести к пропуску дефектов в рельсах. Таким образом, действующая технология настройки УЗ каналов дефектоскопических комплексов несовершенна, требует значительных временных (на тестирование, на контроль выполнения НТД) и материальных затрат и не обеспечивает необходимую достоверность контроля рельсов.

Основная идея предлагаемого способа заключается в измерении в процессе сканирования текущих параметров сигналов от регулярных конструктивных отражателей (КО) объекта контроля, сравнении измеренных параметров с их базовыми значениями и, при их значительном расхождении, в формировании сигнала коррекции чувствительности контроля. Использование регулярно встречающихся на пути сканирования типовых (одинаковых) КО позволяет объективно зафиксировать воздействие негативных факторов и оперативно скорректировать параметры (чувствительность) контроля на конкретном участке пути.

Известен способ автоматической регулировки чувствительности каналов дефектоскопа по уровню структурных шумов в контролируемых рельсах [17]. Однако, как показала практика, оценка только уровня шумов не дает необходимой информации для корректной регулировки чувствительности. Это всего лишь приводит к непомерному возрастанию объемов файлов дефектограмм и к крайнему затруднению процедуры их передачи с бортов скоростных дефектоскопических комплексов в региональные центры расшифровки дефектограмм. Важно, что сильно зашумленные дефектограммы практически непригодны для визуального анализа и выявления дефектов.

В процессе проведения контроля рельсового пути при существенном (например, более $\pm 10\%$) отклонении параметров принимаемых сигналов $\Delta L_{\text{изм}}$ от базового значения ΔL_0 должна вырабатываться управляющая команда по корректировке чувствительности конкретного дефектоскопического канала.

Регулярными КО рельсового пути, которые возможно и целесообразно использовать для коррекции настройки каналов дефектоскопических средств, могут являться:

вторые и третьи отверстия в болтовых стыках (за исключением первых отверстий, не полностью проверяемых из-за близости к торцам рельсов [6]);

донная поверхность рельсов (для настройки каналов прямых ПЭП с углом 0°);

угловые отражатели торцов рельсов в зоне болтовых стыков (образованные торцами и поверхностями головки и подошвы рельсов);

сварные стыки рельсов, например, путем использования характерных отражений от структуры металла в зоне термического влияния (Патент на изобретение № 2573707. Способ контроля качества сварки).

3.2. Обоснование выбора конструктивного отражателя

В данной работе, по примеру [6], исследования проведены для случая, когда в качестве КО выбраны болтовые отверстия диаметром 36 мм болтовых стыков рельсов типа Р65, выполняемых в заводских условиях в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685—2013.

Болтовые стыки являются самыми распространенными конструктивными отражателями на сети дорог ОАО «РЖД». Несмотря на широкое внедрение бесстыкового пути, они имеются в достаточном количестве (более 9 млн стыков) и регулярно фиксируются на дефектограммах.

Правомерность выбора сигналов от болтовых отверстий в качестве тестовых отражателей можно обосновать следующими положениями:

зона залегания отражающих точек от стенок отверстий ($h \approx 105$ мм) находится в зоне образования многих опасных дефектов в шейке рельса и в головке рельса (при однократном отражении лучей от подголовочной грани);

амплитуды сигналов от отверстий и большинства обнаруживаемых дефектов сравнимы (± 8 дБ);

достаточно большое количество реальных дефектов имеют условные размеры, близкие по значениям к условным размерам сигналов от отверстий.

Даже на бесстыковых участках пути, в среднем через каждые 800 м, для компенсации температурного расширения плети следуют от двух до четырех пар разрядных звеньев, соединенных болтовыми стыками. Сигналы от болтовых отверстий на разрядных звеньях могут быть использованы для коррекции чувствительности контроля. Например, при движении дефектоскопического комплекса со скоростью 30 м/с (108 км/ч) сигналы от 12 до 20 отверстий на каждой нитке пути будут фиксироваться через каждые 27 с. Они могут успешно использоваться для определения усредненных параметров сигналов от типовых отражателей и формирования корректирующего сигнала регулировки усиления контроля.

В качестве базового значения ΔL_0 сигналов от КО целесообразно использовать усредненный условный размер пачек сигналов от болтовых отверстий, полученных при благоприятных условиях (малая скорость сканирования, стабильный акустический контакт и т.п.). Например, при контроле рельсов за ΔL_0 можно принять значения параметров сигналов, полученных при периодической (через 3—6 месяцев) проверке работоспособности мобильных средств на специальных испытательных участках пути в соответствии с требованиями ТИ 07.139-2020 (Инструкция по проверке работоспособности средств неразрушающего контроля рельсов на испытательных участках пути, утв. расп. ОАО «РЖД» № 1771/р от 19.08.2020). Как правило, скорости сканирования на этих участках не превышают 30—40 км/ч, и основными измеряемыми характеристиками отражателей являются их условные размеры ΔL .

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ КОРРЕКЦИИ УСИЛЕНИЯ

4.1. Исследование зависимости усиления от скорости сканирования

На рис. 2 приведены зависимости усредненной условной протяженности сигналов ΔL от болтовых отверстий на трех скоростях контроля: 20, 60 и 80 км/ч. Данные получены при обработке

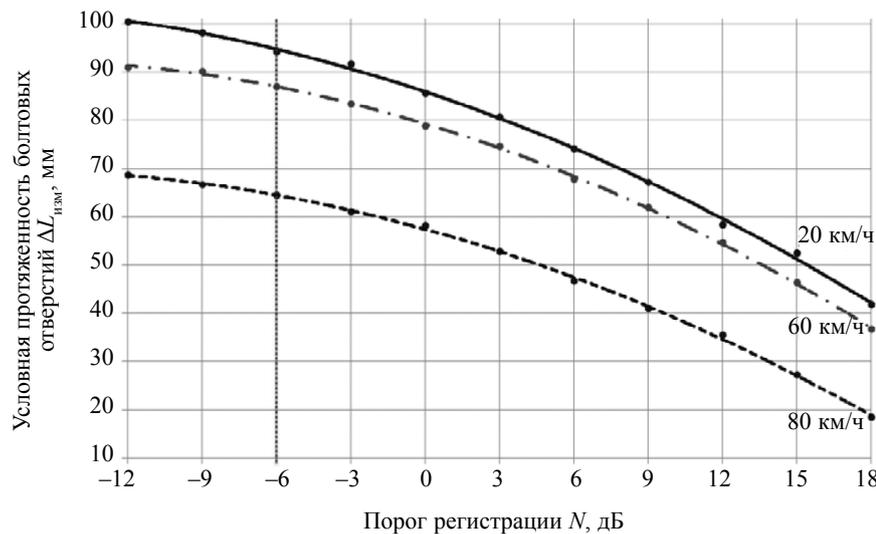


Рис. 2. Зависимость усредненной условной протяженности $\Delta L_{\text{изм}}$ болтовых отверстий от порога регистрации N на скоростях контроля 20, 60 и 80 км/ч.

реальной дефектограммы участка рельсового пути протяженностью около 110 км Юго-Восточной ж/д, проконтролированного скоростным дефектоскопическим комплексом «АВИКОН-03М». На каждом пороге регистрации² измерялись условные протяженности пачек сигналов от 50 болтовых отверстий (отверстия вблизи торцов рельсов не учитывались) и определялось среднее значение $\Delta L_{\text{изм}}$. На рис. 2 видно, что при всех скоростях контроля изменение амплитудного порога регистрации сигналов (чувствительности контроля) приводит к уменьшению измеренной условной протяженности $\Delta L_{\text{изм}}$ сигналов от отверстий по квадратичному закону. Например, при уменьшении чувствительности на 30 дБ (от -12 до $+18$ дБ) значения $\Delta L_{\text{изм}}$ падают на 60—70 %.

При анализе сигналов на уровне регистрации « -6 дБ», являющимся рабочим порогом при поиске дефектных сечений, изменение скорости сканирования на 60 км/ч (с 20 до 80 км/ч) приводит к уменьшению условных размеров отверстий в рельсах примерно на 30 мм (30 %) (расстояние по вертикальной оси между крайними линиями на рис. 2).

Полученные выше зависимости показывают, что величина необходимой коррекции чувствительности дефектоскопического канала при высокоскоростном сканировании одновременно зависит как минимум от двух взаимосвязанных факторов: от скорости сканирования и от условного размера тестового отражателя. В действующих системах контроля текущие значения этих параметров могут быть определены с достаточной для практики точностью.

Располагая данными, содержащими информацию об условной протяженности ΔL , скорости сканирования V и пороге регистрации N , при котором проводились измерения (см. рис. 2), для имеющегося набора сигналов от болтовых отверстий можно установить связь между указанными параметрами. В частности, можно определить зависимость порога регистрации (чувствительности) от условной протяженности при любом фиксированном значении скорости и, тем самым, определить зависимость требуемого значения корректировки чувствительности тракта ΔK_y от измеренных значений ΔL на текущей скорости V . Для этого нужно аппроксимировать конечный набор из M точек в трехмерном пространстве:

$$\{V_m, N_m, \Delta L_m\}_{m=1}^M \quad (1)$$

поверхностью, отражающей связь между условной протяженностью, скоростью и порогом отображения.

Зададим указанную поверхность уравнением следующего вида:

$$\Delta L = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J a_{ij} V^i N^j, \quad (2)$$

²Некоторые отличия представления пороговых уровней на рис. 2 и 3 вызваны анализом сигналов, полученных с разных мобильных средств, с несколько отличающимся программным обеспечением.

где a_{ij} , $i = 0, \dots, I, j = 0, \dots, J$ — некоторые коэффициенты. Определим такие значения коэффициентов a_{ij} , при которых поверхность будет оптимальным образом соответствовать исходному набору данных, а, именно, когда сумма квадратов расстояний от поверхности до набора имеющихся точек будет минимальной. Необходимо найти минимум функции многих переменных:

$$F_L(a) = \sum_{m=1}^M \left(\Delta L_m - \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J a_{ij} V_m^i N_m^j \right)^2.$$

Из условия на экстремум функции $F_L : \frac{\partial F_L}{\partial a_{ij}} = 0$, $i = 0, \dots, I, j = 0, \dots, J$ вытекает система из $(I+1) \times (J+1)$ линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов a_{ij} :

$$\sum_{i'=0}^I \sum_{j'=0}^J \sum_{m=1}^M V_m^{i+i'} N_m^{j+j'} a_{i'j'} = \sum_{m=1}^M V_m^i N_m^j \Delta L_m, \quad i = 0, \dots, I, \quad j = 0, \dots, J. \quad (3)$$

Если в качестве исходных точек в трехмерном пространстве (1) взять данные, изображенные на рис. 2, и при описании поверхности (2) использовать степени скоростей и пороговых значений не выше первой ($I = 1, J = 1$), то в результате решения системы уравнений (3) мы получим следующие значения четырех имеющихся в данном случае коэффициентов:

$$a_{00} \approx 93,8, \quad a_{01} \approx -2,06, \quad a_{10} \approx -0,432, \quad a_{11} \approx 0,00465,$$

и зависимость N от V и ΔL будет задаваться выражением:

$$N = \frac{\Delta L}{a_{11}V + a_{01}} - \frac{a_{10}V + a_{00}}{a_{11}V + a_{01}}. \quad (4)$$

На рис. 3 показана полученная связь между N , V и ΔL вместе с использованными в расчетах исходными данными.

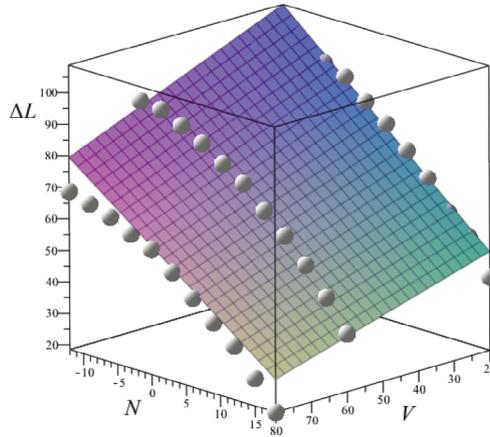


Рис. 3. Поверхность в трехмерном пространстве, отображающая связь между условной протяженностью ΔL , скоростью V и порогом регистрации N сигналов контроля.

На рис. 4 представлены зависимости $N(\Delta L)$ для нескольких фиксированных значений скорости (40, 60, 80, 100 км/ч).

Из рис. 4 видно, что, например, при скорости движения 100 км/ч для измеренного усредненного размера пачки сигналов от типовых отверстий $\Delta L_{\text{изм}} = 70$ мм, чтобы достигнуть некоторой

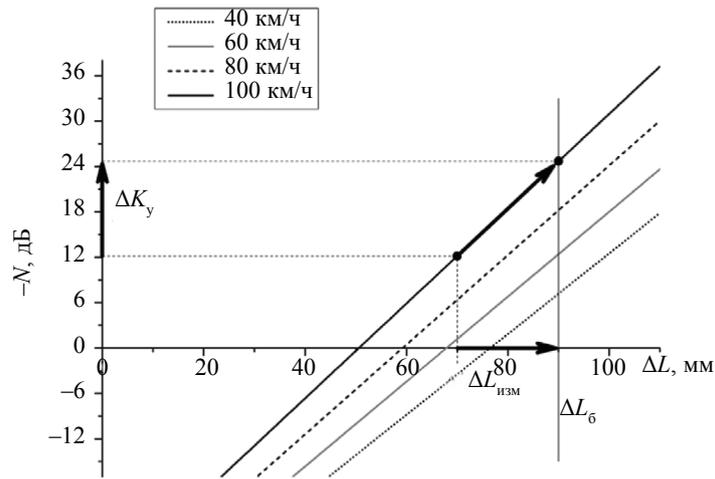


Рис. 4. Пример определения величины требуемой коррекции усиления ΔK_y при заданных ΔL_6 , скорости V и текущего значения $\Delta L_{изм} = 70$ мм.

базовой протяженности $\Delta L_6 = 90$ мм, требуется ввести усиления на 12 дБ. В общем случае зависимость требуемой величины усиления от ΔL_6 , $\Delta L_{изм}$ и скорости V выражается следующей формулой:

$$\Delta K_6 = -\frac{\Delta L_a - \Delta L_{еcl}}{a_{11}V + a_{01}}. \tag{5}$$

Для фиксированного базового значения $L_6 = 90$ мм (измеренного при благоприятных условиях, на малых скоростях сканирования с хорошим акустическим контактом) по выражению (5) можно построить зависимости, показывающие величину необходимой коррекции усиления приемного тракта дефектоскопического канала ΔK_y при снижении в ходе рабочего проезда текущего значения условной протяженности сигналов от тестовых отверстий $\Delta L_{изм}$ (рис. 5). Видно, что в диапазоне практических значений условной протяженности болтовых отверстий (например, в пределах от 90 до 40 мм) величина необходимой корректировки усиления ΔK_y может составить около 30 дБ.

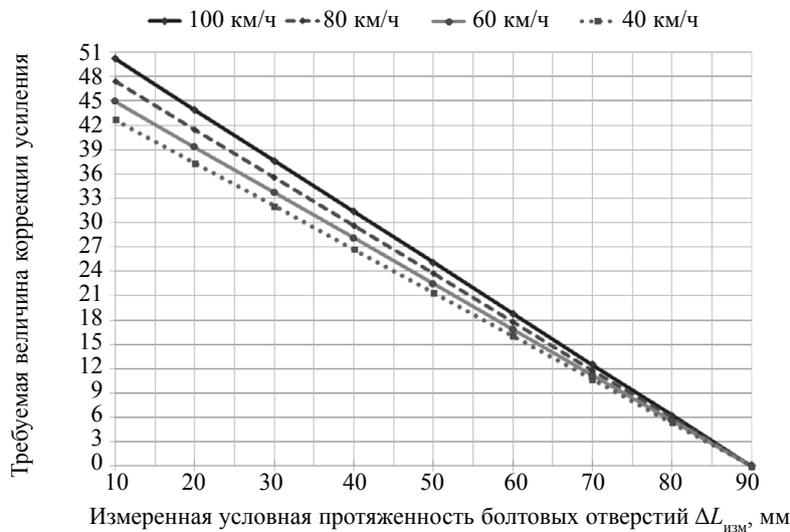


Рис. 5. Величина коррекции усиления ΔK_y при изменении измеренной условной протяженности сигналов от болтовых отверстий $\Delta L_{изм}$ (при $L_6 = 90$ мм).

Погрешность измерения условной протяженности отражателей и дефектов $\Delta L_{\text{изм}}$ (рис. 1—6) складывается из дискретности посылок зондирующих импульсов и точности ручного измерения пачек сигналов по экрану компьютера и не превышает 4 % (рассчитана при измерении не менее 30 отверстий и усредненного значения $\Delta L_{\text{изм}} = 40$ мм на скорости 100 км/ч, см. рис. 6). Указанная погрешность может быть минимизирована при излучении/приеме УЗ колебаний с помощью сдвоенных ПЭП и при программной автоматизации измерения условных размеров (автоматическая расшифровка дефектограмм). Эти функции во многом уже реализованы в современных образцах диагностических комплексов.

Дополнительно проведена оценка погрешности измерения условной протяженности $\Delta L_{\text{изм}}$ сигналов от болтовых отверстий при многократных проездах. Для этого в трех разных файлах проездов вагона-дефектоскопа по однотипным участкам пути Октябрьской ж/д в канале ПЭП 45° измерили по 50 отверстий на приблизительно одинаковой скорости контроля (около 45 км/ч). Разброс полученных усредненных значений $\Delta L_{\text{изм}}$ отверстий не превышает 5,5 %. Это подтверждается и опытом многолетнего визуального анализа УЗ дефектограмм сплошного контроля рельсов: при номинальных параметрах контроля средний размер $\Delta L_{\text{изм}}$ пачек сигналов от болтовых отверстий (за исключением первых отверстий) от проезда к проезду существенно не меняется. Ранее это позволило разработчикам НТД (Положение по расшифровке от 09.01.2018 г. № ЦДИ-1/р) установить фиксированное значение пороговой величины $\Delta L_{\text{мин}}$ (см. рис. 1).

Таким образом, можно считать, что результирующая погрешность определения усредненного значения $\Delta L_{\text{изм}}$ на практике не превышает 5,5 % при корректной настройке УЗ каналов.

Как видно на рис. 5, для одного и того же значения $\Delta L_{\text{изм}}$ разброс значений ΔK_y для разных скоростей сканирования составляет незначительную величину. Например, во время проезда дефектоскопного средства от набора отверстий получено усредненное значение $L_{\text{изм}} = 40$ мм. Величина необходимой коррекции усиления на скорости 100 км/ч отличается от аналогичной величины коррекции на скорости 40 км/ч всего на 5 дБ. Основное влияние скорости сканирования, как показано в [6, 11], уже опосредованно заложено в динамическом изменении параметра $\Delta L_{\text{изм}}$.

Это обстоятельство может существенно облегчить практическую реализацию системы автоматической динамической корректировки усиления по измеряемым параметрам сигналов от тестовых отражателей (от болтовых отверстий). Достаточно лишь измерить текущее значение $\Delta L_{\text{изм}}$ от набора отверстий и скорректировать чувствительность канала на определенное по графику рис. 5 значение ΔK_y . При этом сигналы от последующих типовых отражателей будут иметь значения, близкие к ΔL_6 , а потенциальные дефекты в рельсах будут обнаруживаться так же, как и при нормальных условиях сканирования.

При недостатке предусмотренного в аппаратуре диапазона регулировки усиления, рассчитанного по выражению (5), коррекцию чувствительности можно осуществить путем частичной регулировки усиления плюс дискретного увеличения амплитуды зондирующего импульса, как это предусмотрено в современных диагностических комплексах.

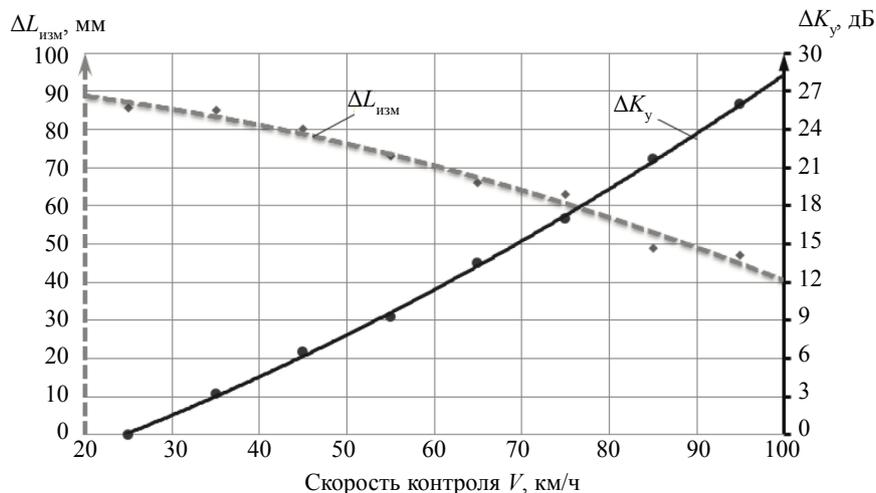


Рис. 6. Зависимость условной протяженности $\Delta L_{\text{изм}}$ пачек сигналов от болтовых отверстий (левая ось) и величины коэффициента усиления ΔK_y (правая ось) при увеличении скорости контроля.

Несмотря на зависимость искомого параметра ΔK_y в общем случае от нескольких параметров ($\Delta L_{изм}$, ΔL_6 , V и коэффициентов a_{11} и a_{01}), для практической реализации в рабочем диапазоне скоростей сканирования может быть получена упрощенная зависимость величины корректировки коэффициента усиления ΔK_y при увеличении скорости контроля (см. рис. 6).

Рис. 6 демонстрирует, что с увеличением скорости сканирования на каждые 10 км/ч условный размер болтовых отверстий $\Delta L_{изм}$ уменьшается в среднем на 6—7 %. При увеличении скорости с 20 до 100 км/ч для сохранения качества проводимого контроля следует увеличить чувствительность (в данном примере — на 28—30 дБ).

4.2. Алгоритм динамической коррекции чувствительности контроля

Последовательность операций по динамической (во время проезда скоростного дефектоскопа) корректировке чувствительности контроля с учетом получаемых характеристик сигналов от болтовых отверстий можно представить в виде следующего алгоритма (рис. 7).

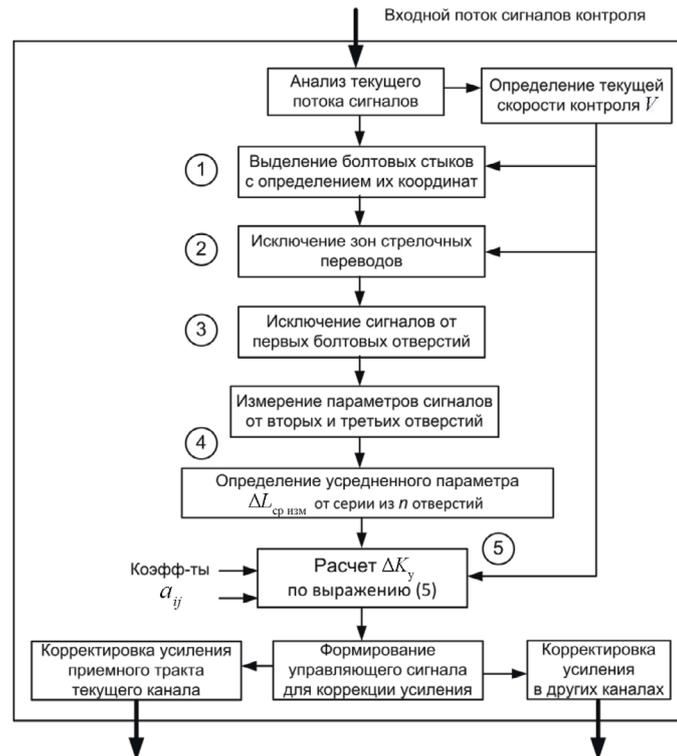


Рис. 7. Примерный алгоритм динамической коррекции чувствительности контроля.

Во время проезда из потока принимаемых в процессе сканирования сигналов по специальному алгоритму (подпрограмма 1 на рис. 7) выделяются группы сигналов в зоне болтовых стыков. Из потока данных целесообразно исключить сигналы, получаемые в зонах стрелочных переводов (кроме сигналов от примыкающих разрядных звеньев). В этих зонах ходовая часть любой подвижной единицы испытывает значительные динамические воздействия [18], и сигналы, получаемые на этих участках, могут отличаться от сигналов, фиксируемых на перегонах. Ввиду особенностей данных участков, вопросы обеспечения корректного контроля на стрелочных переводах должны рассматриваться отдельно. Возможный вариант распознавания зон стрелочных переводов (подпрограмма 2 на рис. 7) и даже их проектов (типов) предложен в патенте на изобретение № 2652673 «Способ определения стрелочных переводов и положения остряков».

Как показано в [6], при сплошном сканировании принятыми схемами УЗ прозвучивания первые болтовые отверстия (подсчет от стыкового зазора) озвучиваются не полностью из-за малой протяженности зоны локации со стороны торцов рельсов. Поэтому с помощью специальной подпрограммы 3 (см. рис. 7) сигналы от первых болтовых отверстий должны быть также исключены

из рассмотрения. Измерение параметров набора вторых и третьих отверстий, определение их усредненной условной протяженности $\Delta L_{\text{ср изм}}$, а также сравнение полученного параметра с базовым значением ΔL_6 выполняется в отдельной подпрограмме 4. По полученным данным ($\Delta L_{\text{изм}}$ и V) с помощью выражения (5) подпрограммой 5 рассчитывается требуемая величина коррекции ΔK_y и формируется управляющий сигнал для коррекции коэффициента усиления приемного тракта конкретного дефектоскопического канала.

Для корректировки параметров других УЗ каналов (ПЭП 58°, 70°, 0°) в процессе сканирования могут быть использованы конструктивные отражатели рельсов, указанные в разд. 3.1. Все это требует дополнительных исследований, однако соответствующие подходы выравнивания параметров контроля и алгоритм корректировки параметров высокоскоростной дефектоскопии остаются общими.

При существенном отличии характеристик контролируемого участка пути (рельсы других производителей, пропущенный тоннаж, грузонапряженность и т.п.) возможно потребуются предварительная корректировка коэффициентов a_{ij} в выражении (5). В общем случае можно организовать определение закономерности поведения условных размеров типовых отражателей (например, болтовых отверстий), аналогично рис. 6, и расчет коэффициентов a_{ij} в процессе рабочего проезда после набора скорости сканирования до определенной величины.

Предварительная проверка предложенного принципа корректировки чувствительности дефектоскопических каналов проведена на реальных дефектах в головке рельсов (рис. 8). Как видно, после добавления усиления ΔK_y условные размеры пачек сигналов от дефектов увеличились в 3—6 раз, что обеспечивает их надежное обнаружение.

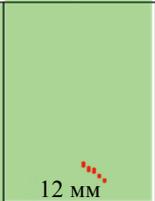
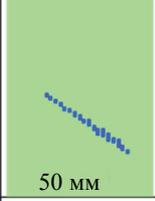
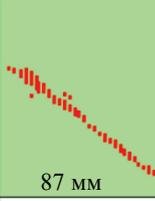
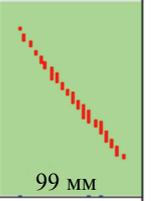
	Дефект 1	Дефект 2	Дефект 3	Дефект 4
<i>a</i>				
До коррекции				
ΔL_1	19 мм	19 мм	12 мм	17 мм
<i>б</i>				
После коррекции чувствительности				
ΔL_2	50 мм	87 мм	63 мм	99 мм
ΔK_y	+9 дБ	+12 дБ	+15 дБ	+20 дБ

Рис. 8. Размеры пачек сигналов от дефектов рельсов до (*a*) и после (*б*) корректировки чувствительности контроля.

Как показывает практика, с увеличением чувствительности контроля не происходит существенное возрастание шумовой составляющей. Видимо, это связано с идентичным воздействием негативных факторов при больших скоростях сканирования как на амплитуду сигналов от дефектов, так и на уровень шумов.

Кроме выравнивания чувствительности каналов при внешних воздействиях, отслеживание процедур автоматического управления параметрами каналов может дать дополнительную информацию о работе многоканальной дефектоскопической системы. Если в процессе контроля из нескольких однотипных каналов один из них в процессе рабочего проезда требует более частой корректировки чем остальные, то это является поводом для более детального анализа акустического тракта с целью выяснения и устранения причины нестабильности. Например, для контроля сечения рельса в проекции шейки используются по два наклонных ПЭП с $\alpha = 45^\circ$ для каждой нитки пути. При этом три канала (при контроле обеих ниток) требуют, в соответствии с приведенным выше алгоритмом, весьма плавных регулировок с изменением скорости, а для нормальной работы одного канала, формирующего пачки сигналов от болтовых отверстий меньшей протяженности, управляющее воздействие пришлось оказывать многократно,

причем не всегда из-за изменения скорости контроля. Детальный анализ после проезда позволил выяснить, что механика крепления акустического блока, на котором расположен данный ПЭП, требует замены из-за значительного износа.

Таким образом, предлагаемая технология оперативной (динамической) корректировки чувствительности с использованием отражений от конструктивных элементов контролируемого объекта в условиях высокоскоростного контроля и/или действия неблагоприятных факторов позволит повысить достоверность обнаружения дефектов.

ВЫВОДЫ

1. При контроле рельсов на высоких скоростях сканирования (до 120 км/ч) неизбежные воздействия негативных факторов приводят к существенному ухудшению качества контроля и к уменьшению основного измеряемого параметра — условного размера ΔL потенциальных дефектов.

2. Действующая технология настройки дефектоскопических каналов в стационарных условиях и неизменность этих настроек при разных скоростях сканирования не обеспечивает требуемое качество контроля и может привести к пропуску опасных дефектов.

3. С целью сохранения стабильного качества контроля при увеличении скорости контроля предложено корректировать чувствительность приемного тракта дефектоскопических каналов с учетом измерения условных размеров типовых отражателей в контролируемом изделии (например, болтовых отверстий в рельсах).

4. Предложенный алгоритм динамической корректировки чувствительности при высокоскоростном контроле может быть реализован на практике и будет способствовать повышению достоверности обнаружения дефектов.

Авторы благодарят главного специалиста по дефектоскопии АО «Радиоавионика» С.Л. Молоткова за ценные замечания и предложения, высказанные в процессе подготовки статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clark R. Rail flaw detection: Overview and needs for future developments // NDT & E International. 2004. V. 37. No. 2. Mar. 2004. P. 111—118.
2. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов / Справочник. М.: Металлургия, 1991. 752 с.
3. Xu P., Zhu C., Zeng H., Wang P. Rail crack detection and evaluation at high speed based on differential ECT system // Measurement. 2020. V. 166. P. 108152.
4. Марков А.А., Кузнецова Е.А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Книга 2. Расшифровка дефектограмм. С-Пб.: Ультра Принт, 2014. 332 с.
5. Тарабрин В.Ф. Система стандартизации и метрологического обеспечения скоростных средств дефектоскопии рельсов при их производстве и эксплуатации // Контроль. Диагностика. 2021. № 5 (275). С.14—29.
6. Markov A.A., Maximova E.A. Analyzing Ultrasonic Signal Parameters during High-Speed Rail Inspection // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 3. P. 181—194. [Марков А.А., Максимова Е.А. Анализ параметров ультразвуковых сигналов при высокоскоростном контроле рельсов // Дефектоскопия. 2021. № 3. С. 3—16.]
7. Гурвич А.К., Ермолов И.Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев: Техника, 1972. 460 с.
8. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. М.: Изд-во «СВЕН», 2014. 494 с.
9. Гурвич А.К., Кузьмина Л.И. Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов. Киев: Техника, 1980. 101 с.
10. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Байтеряков А.В. Структурно-чувствительные акустические параметры конструкционных сталей. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2020. 151 с.
11. Марков А.А. Особенности оценки условных размеров дефектов при значительных скоростях сканирования // Дефектоскопия. 1989. № 3. С. 8—16.
12. Yuan F., Yu Y., Wang W., Tian G. A Novel Probe of DC Electromagnetic NDT Based on Drag Effect: Design and Application in Crack Characterization of High-Speed Moving Ferromagnetic Material // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2021. V. 70. March 2021. DOI: 10.1109/TIM.2021.3069036
13. Марков А.А., Захарова О.Ф., Мосягин В.В. Применение развертки типа «В» для обнаружения трещин в зоне отверстий болтовых стыков железнодорожных рельсов // Дефектоскопия. 1999. № 6. С. 78—92.
14. Huang X.Y., Shi Y.S., Zhang Y.H., Li P., Xiong L.H., Zhong Y.C. BP neural network based on rail flaw classification of RFD car's B-scan data // China Railway. 2018. No. 03. P. 82—87.

15. *Молотков С.Л.* Чувствительность и амплитудные измеряемые характеристики дефекта. Обзор изменений в рельсовой дефектоскопии за четверть века // В мире неразрушающего контроля. 2020. № 3 (89). С. 62—73.
16. *Ермолов И.Н.* Методы ультразвуковой дефектоскопии. Ч.1. Московский горный институт, 1966. 267 с.
17. *Тарабрин В.Ф., Чистякова О.Е., Кисляковский О.Н., Кононов Д.А.* Автоматическая регулировка чувствительности каналов дефектоскопа с использованием адаптивного порога // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т. 19. № 3. С. 77—80.
18. *Ермаков В.М., Егоров М.А.* Динамическое моделирование взаимодействия стрелочного перевода с подвижным составом // Железнодорожный транспорт. 2016. № 8. С. 64—66.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АДАПТИВНЫЙ ТОМОГРАФ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ С НЕСТАНДАРТНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ

© 2021 г. В.К. Качанов^{1,*}, И.В. Соколов¹, Р.В. Концов¹, М.Б. Федоров¹, В.В. Первушин¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва,
ул. Красноказарменная, 14
E-mail: *kachanovvk@mail.ru

Поступила в редакцию 13.10.2021; после доработки 22.11.2021
Принята к публикации 23.11.2021

Показано, что для ультразвуковой томографии бетонных строительных конструкций с нестандартной конфигурацией поверхности следует использовать ультразвуковые адаптивные антенные решетки, позволяющие принимать форму неплоской поверхности контролируемого изделия. Также следует применять адаптивные методы ультразвуковой томографии, позволяющие одновременно определять координаты дефектов и скорость ультразвуковых колебаний в бетоне и подстраивать параметры зондирующих сигналов под характеристики бетонных изделий.

Ключевые слова: ультразвуковая томография изделий из бетона, адаптивная антенная решетка, безэталонный способ определения скорости ультразвуковых волн, алгоритм «фокусировка в точку».

DOI: 10.31857/S0130308221120022

ПРОБЛЕМА КОНТРОЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ БЕТОНА С НЕСТАНДАРТНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ

С помощью одноканальных приборов ультразвукового (УЗ) эхо-импульсного контроля не удается контролировать строительные конструкции (СК) толщиной более 1 м из-за аномально большого интегрального затухания ультразвука в крупногабаритных СК из бетона [1]. Поэтому для контроля изделий из бетона в последние годы используют УЗ томографы с фазированными антенными решетками (АР) [2—6].

В УЗ томографии изображение контролируемого изделия осуществляется с использованием алгоритма «фокусировка в точку», при котором с помощью АР производится фокусировка УЗ луча последовательно в каждую j -ю точку изделия [7]. Построение изображения изделия осуществляется посредством последовательного излучения каждым элементом антенны УЗ зондирующего сигнала, который проходит путь $L_{\Sigma j} = L_{\text{изл}} + L_{\text{отр}j}$, состоящий из пути $L_{\text{изл}}$ от излучающего преобразователя (ИП) до j -й точки изделия и пути $L_{\text{отр}j}$ от отражателя в j -й точке до каждого приемного преобразователя (ПП) антенны. Время задержки сигналов $T_{\text{зад}j}$ для каждой j -й точки изделия (для каждого канала) определяется по времени прохождения импульса от ИП до дефекта и далее до каждого ПП антенны: $T_{\text{зад}j} = L_{\Sigma j} / C = (L_{\text{изл}} + L_{\text{отр}j}) / C$ (где C — скорость ультразвука в бетоне). При наличии в j -й точке отражателя (дефекта или акустической неоднородности) после когерентного суммирования сигналов во всех каналах формируется импульс с амплитудой $U_{\Sigma j}$. При отсутствии отражателя амплитуда эхосигнала, отраженного от j -й точки, равна нулю. Аналогично проводится последовательная фокусировка УЗ сигналов в каждую точку объекта контроля, а затем по совокупности эхосигналов, отраженных от всех точек изделия, строится томограмма объекта контроля (ОК).

Принцип построения УЗ линейных АР позаимствован у радиолокационных антенн, у которых расстояние между n элементами решетки d составляет примерно половину длины волны λ электромагнитных колебаний, а зондирующие импульсы представляют собой гармонические сигналы с фиксированной частотой. Так как скорость электромагнитных колебаний неизменна, то в радиолокационных антеннах обеспечивается неизменное соотношение $d/\lambda \approx 0,5$, которое позволяет осуществлять когерентное суммирование парциальных гармонических сигналов и формировать диаграмму направленности (ДН) антенн с минимальным уровнем боковых лепестков [8, 9].

В отличие от радиолокации скорость ультразвука в различных изделиях из бетона разная. Поэтому при контроле СК следует предварительно определять значение скорости ультразвука для данной марки бетона. Кроме того, из-за разброса скоростей в бетонных ОК сложно реализовать условие $d/\lambda \approx 0,5$ при жесткой конструкции УЗ линейной АР с постоянным шагом d (например, в УЗ томографе А1040 MIRA шаг АР фиксирован и равен $d = 30$ мм [10]). Из-за этого в ДН

УЗ антенны присутствуют боковые лепестки, ухудшающие качество изображения СК в области, расположенной с боку от АР. Поэтому в УЗ томографах ограничивают угол обзора АР областью, расположенной под АР.

Все существующие УЗ томографы СК из бетона ориентированы на контроль изделий с плоской поверхностью (стен, перекрытий зданий, дорожных покрытий, фундаментов и др.), которые можно назвать изделиями со стандартной конфигурацией поверхности. АР таких томографов «работают» по принципу «совмещенного» пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), когда один и тот же ПЭП (одна и та же АР) и излучает зондирующий импульс и принимает эхо-сигнал. Однако с помощью таких традиционных УЗ томографов не удастся контролировать СК с нестандартной (неплоской) конфигурацией поверхности. Ниже приведен ряд таких нестандартных объектов.

Во-первых, это широко распространенные СК типа «соединение двух стен», которые образуют поверхности типа «внутренний угол» (рис. 1а, б). В этом случае существует проблема поиска дефектов, находящихся в области стыка двух стен. С помощью традиционных АР такой дефект обнаружить не удастся из-за ограниченного угла обзора антенны. Поэтому для контроля подобных СК следует использовать АР с относительно большим углом наклона УЗ луча при использовании двух отдельных АР (а) или одной АР (б). При наличии двух АР возможно их использовать в различных режимах: как «излучающая» (АР1) и «приемная» (АР2), или в режиме своеобразной «совмещенной» АР, когда обе части и излучают и принимают УЗ сигналы. Контролю таких угловых соединений посвящена статья [11], где показывается, что при боковом излучении оптимальный шаг АР уменьшается: $d \approx 0,4\lambda$. Если же шаг АР больше оптимального, то при таком наклонном излучении отношение сигнал/структурный шум уменьшается, структурный шум возрастает, что ограничивает возможность обнаружения дефекта в угловой зоне СК из сложно-структурного бетона.

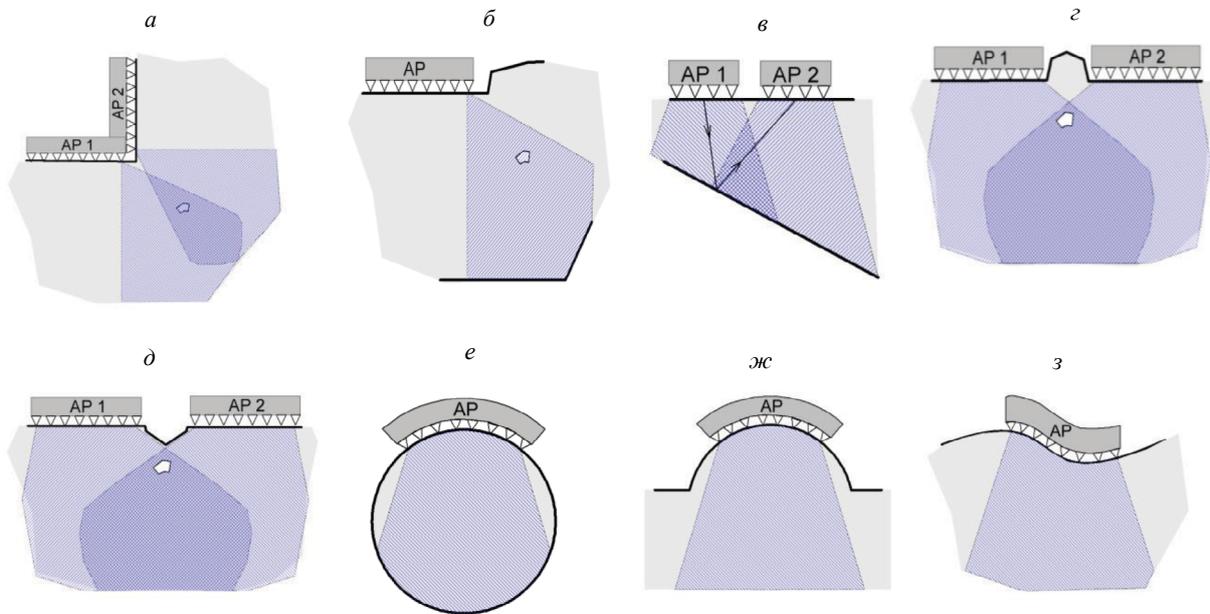


Рис. 1. Примеры нестандартных СК:

а — угловое соединение двух стен; б — наличие выступа на стене; в — СК с отражающей поверхностью, расположенной под углом к плоскости контроля; з — СК с наличием выступа на поверхности; д — СК с наличием впадины; е — колонна; ж — полуколонна; з — СК с произвольной формой поверхности.

Во-вторых, к нестандартным объектам контроля следует отнести изделия, у которых поверхность отражения не параллельна поверхности контроля. Из схемы на рис. 1в видно, что и в этом случае необходимо обеспечить наклонное излучение УЗ сигнала, так как иначе при использовании «совмещенной» АР с ограниченной апертурой не всегда возможно зафиксировать зеркально отраженные сигналы от плоскостей, расположенных под большим углом к плоскости контроля. В [12]

мы показали, что для обнаружения отраженного от наклонного дна эхосигнала следует использовать предложенный в МЭИ алгоритм работы УЗ ФАР «фокусировка на плоскость», при котором АР разделена на две отдельные АР (излучающую (АР1) и приемную (АР2)), что предполагает создание иного алгоритма работы УЗ томографа.

В-третьих, к СК с нестандартной конфигурацией следует отнести изделия, у которых на плоской поверхности имеются выступы (ε) или впадины (δ). В этом случае следует использовать две отдельные АР, т.к. «совмещенную» АР невозможно разместить над дефектным местом.

В-четвертых, это изделия типа колонна (ε) или полуколонна (ε). Очевидно, что в этих случаях необходима разработка АР, форма которой принимает форму круглой или овальной поверхности СК.

В-пятых, это разнообразные бетонные изделия с неплоскими поверхностями, которые получили широкое распространение по мере развития строительства зданий из монолитного бетона (ε).

Для контроля каждой такой нестандартной СК необходима разработка отдельной или раздельно-совмещенной АР, форма которой принимает форму поверхности изделия, однако заранее предугадать форму таких нестандартных объектов контроля достаточно сложно. Поэтому, учитывая большое разнообразие возможных форм СК из бетона, целесообразно для решения указанных задач разрабатывать не индивидуальное устройство для каждой новой конфигурации СК, а создавать универсальный томограф с адаптивной антенной решеткой, принимающей форму того или иного ОК. При этом одновременно необходимо разрабатывать адаптивные методы УЗ контроля, осуществляющие адаптацию зондирующих сигналов под параметры АР и характеристики контролируемого изделия, а также создавать соответствующее оборудование и специализированное программное обеспечение (ПО), с помощью которого осуществляется построение томограмм изделий.

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ МЕТОДОВ УЗ ТОМОГРАФИИ ИЗДЕЛИЙ С НЕСТАНДАРТНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ

В основу разработки адаптивных методов УЗ контроля нами был положен метод адаптации зондирующего сигнала, используемый при безэталонном определении одновременно скорости ультразвука в бетоне и координат дефекта в изделии. В последние годы проблемам безэталонного контроля изделий уделяется много внимания [13, 14], в нашем случае для безэталонной томографии использовался алгоритм «фокусировка в точку» [7], с помощью которого осуществлялось зондирование бетонного плоскопараллельного блока толщиной $H = 400$ мм с отверстием диаметром 40 мм на глубине $h = 200$ мм УЗ сигналами с фиксированной частотой $f = 100$ кГц при расположении АР непосредственно над дефектом. С помощью алгоритма «фокусировка в точку» в вычислительном устройстве производилось построение большого количества трехмерных томограмм (порядка $k \approx 10^2$), построенных при различных значениях расчетной скорости $C_{\text{расч}}$. Далее для всех построенных томограмм определялись амплитуды пиков и их координаты, а затем находилась томограмма с наибольшей амплитудой эхосигнала от дефекта U_{Σ} . На рис. 2 показаны

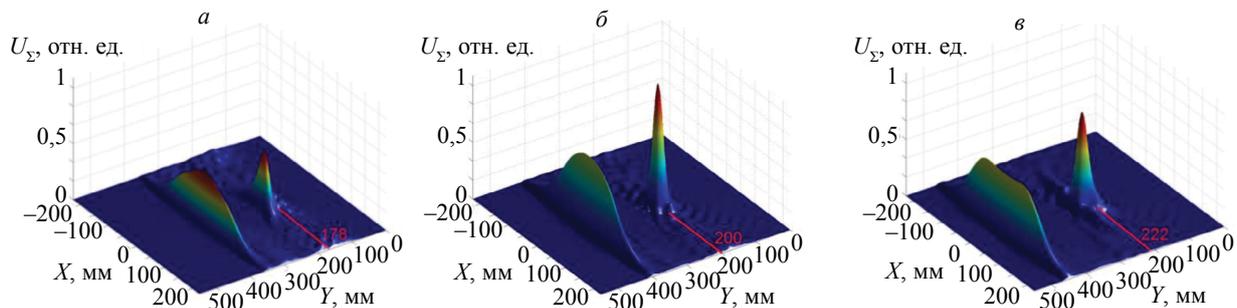


Рис. 2. Томограммы, представленные в виде графиков трехмерной поверхности, построенные при различных значениях расчетной скорости акустических колебаний:

a — $C_{\text{расч},a} = 3500$ м/с; b — $C_{\text{расч},b} = 4000$ м/с; v — $C_{\text{расч},v} = 4500$ м/с (моделирование).

только три томограммы, построенные для разных значений расчетной скорости ультразвуковых продольных волн $C_{\text{расч.}a} = 3500$ м/с (а); $C_{\text{расч.}b} = 4000$ м/с (б) и $C_{\text{расч.}в} = 4500$ м/с (в). На каждой из томограмм четко виден пик U_{Σ} , соответствующий точечному дефекту, при этом на томограмме, показанной на рис. 2б, амплитуда пика максимальная. Поэтому по этой томограмме определялось значение скорости УЗ волн в бетонном изделии $C = 4000$ м/с, а затем по этой же томограмме устанавливались координаты дефекта ($h = 200$ мм) [7].

Достоверность полученных значений скорости ультразвука и координат дефекта поясняется принципом формирования сигнала U_{Σ} , который заключается в когерентном суммировании парциальных эхосигналов, поступающих на все элементы антенны. При неизменной частоте УЗ сигнала f и при использовании АР с неизменным шагом решетки d максимум просуммированного сигнала определяется величиной скорости УЗ колебаний в бетоне $C = \lambda f$. Это означает, что в данном примере именно при скорости ультразвука $C = 4000$ м/с возникают оптимальные условия для синфазного сложения парциальных сигналов и, тем самым, для формирования максимальной амплитуды суммарного сигнала U_{Σ} . При иных значениях скорости амплитуда эхо-сигнала от дефекта и координаты пика существенно изменяется: из томограмм на рис. 2 видно, что при отклонении скорости ультразвука в бетоне от реального значения $C = 4000$ м/с на 12 % координаты отверстия изменяются на 12 %, а амплитуда полезного сигнала уменьшается на ≈ 6 дБ.

Достоинство рассмотренного адаптивного метода томографии заключается не только в возможности безэталонного измерения одновременно скорости ультразвука и координат дефекта при фиксированном шаге АР и при неизменной частоте зондирующего сигнала, но и в том, что он позволяет производить адаптивную подстройку частоты сигнала в условиях структурного шума и частотно-зависимого затухания ультразвука. Однако для реализации такого адаптивного метода томографии необходима соответствующая аппаратура, позволяющая производить подстройку частоты.

Тем самым, с помощью рассмотренного адаптивного безэталонного метода возможно производить адаптацию параметров контроля для поиска дефектов, расположенных в СК с нестандартной конфигурацией, — определять скорость ультразвука или подбирать оптимальную частоту зондирующего сигнала. Такая адаптация параметров сигнала (выбор оптимальной скорости звука) была использована в УЗ томографе, предназначенном для обнаружения дефектов, расположенных в угловой зоне соединения двух стен [11] при использовании раздельно-совмещенной «угловой» антенной (рис. 3а). В антенне использовались УЗ широкополосные ПЭП с сухим точечным контактом, работающие на поперечных типах волн с центральной частотой 50 кГц. Дефект представляет собой цилиндрическое отверстие диаметром 50 мм, расположенное вблизи ребра двугранного угла на расстоянии 200 мм от каждой из стенок. На рис. 3б приведена схема контроля углового соединения (а), при которой излучают и принимают эхосигналы обе «половинки» угловой антенны. На рис. 3в показана томограмма угловой зоны двух стен, на которой четко фиксируется дефект, который не удастся обнаружить при использовании стандартной АР с плоской поверхностью.

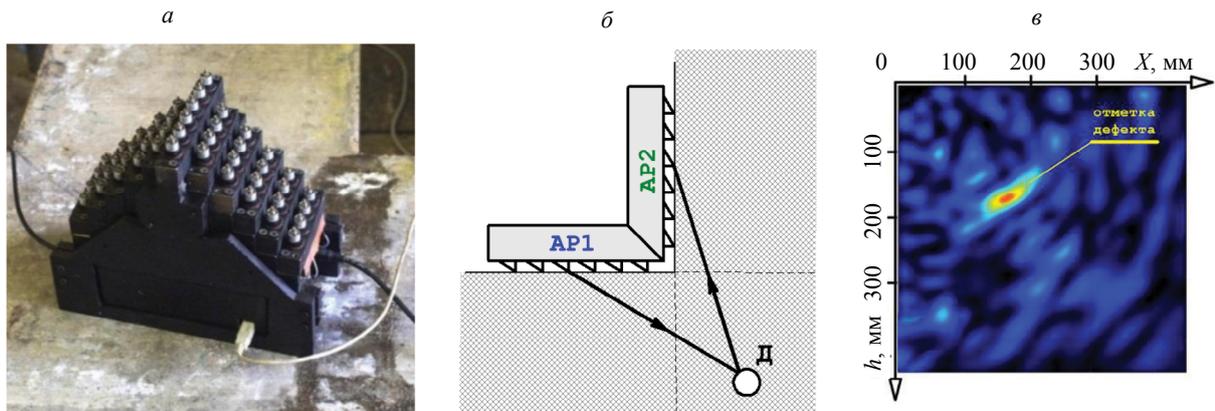


Рис. 3. Обнаружение дефекта в угловой зоне соединения двух стен с помощью угловой раздельной антенны: а — угловая антенна для контроля изделий типа «внутренний угол»; б — схема контроля обеими «половинками» антенны; в — двухмерная томограмма изделия [11].

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АДАПТИВНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ ТОМОГРАФИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С НЕПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Так как при контроле СК с неплоской поверхностью невозможно использование традиционной АР с плоской поверхностью, то нами была разработана УЗ адаптивная АР, форма которой определяется формой поверхности СК. Адаптивная АР состоит из звеньев, показанных на рис. 4а, каждое из которых состоит из двух элементов, а каждый элемент состоит из 4-х ПЭП с сухим точечным контактом (СТК) [15]. Необходимость параллельного соединения 4-х ПЭП с СТК вызвана необходимостью обеспечить должную ширину ДН звена в направлении, перпендикулярном плоскости визуализации (плоскости сканирования). ПЭП с СТК работают на поперечных типах волн с центральной частотой $f_0 = 50$ кГц, которая определяет среднюю частоту зондирующего широкополосного сигнала. Звенья АР соединяются гибкими шарнирами, они подвижны в двух осях (рис. 4б). Такое соединение позволяет обеспечить поворот блоков вокруг двух осей и прижатие АР как к внешнему, так и к внутреннему углам СК.

На рис. 4в, г изображены возможные конфигурации подвижного соединения двух блоков АР — угол раскрытия АР составляет до 120° как внутрь, так и наружу. На рис. 4д показаны пространственные положения элементов АР, обеспечивающие прижатие АР к СК различной конфигурации. Для обеспечения качественного прижатия АР к поверхности СК использовалась силиконовая прокладка. Каждое звено адаптивной АР в УЗ адаптивном томографе, изготовленном в ООО «КБ СА Лагрон плюс», представляет собой отдельный модуль, содержащий усилитель, ЦАП и АЦП.

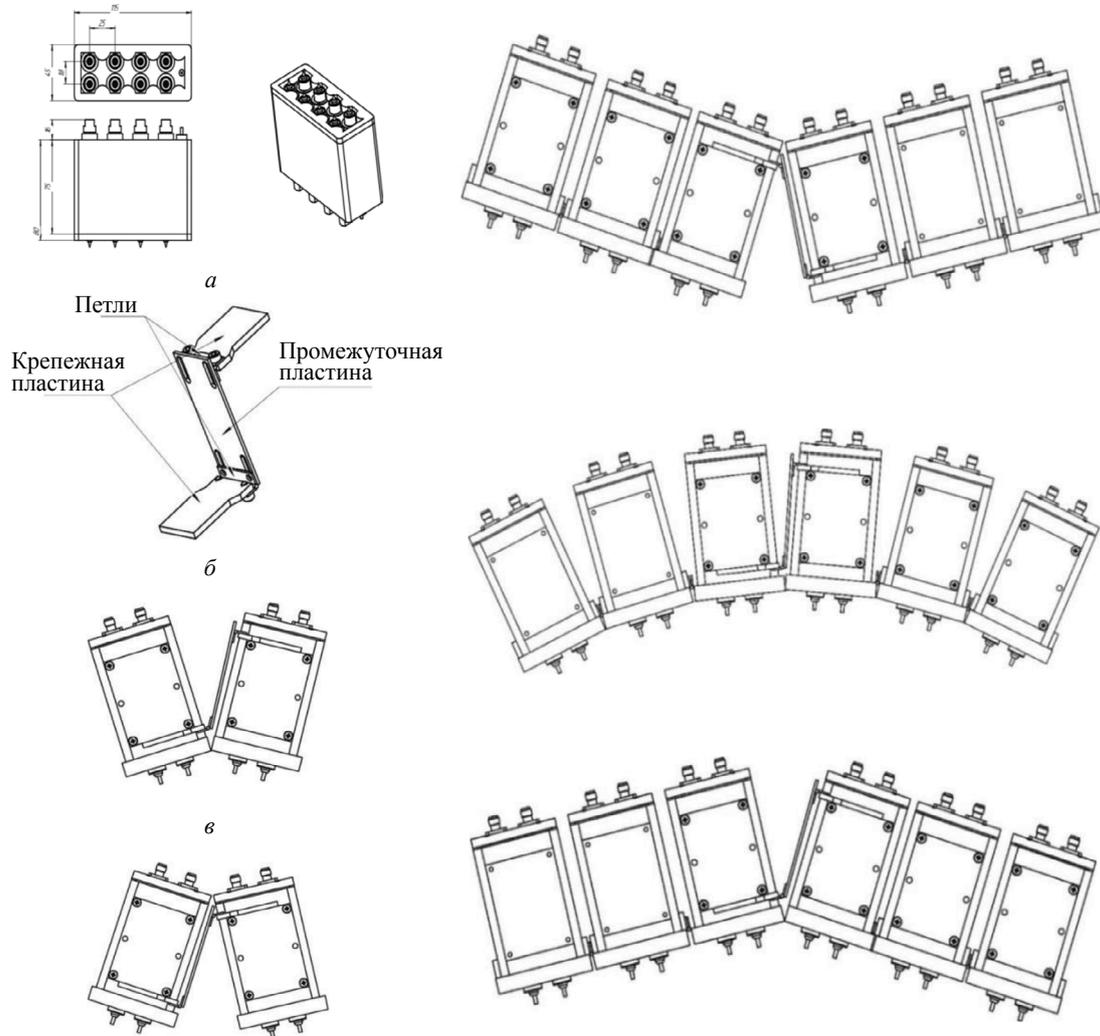


Рис. 4. Элементы адаптивной антенной решетки: а — звено АР с 8 ПЭП; б — элемент подвижного соединения звеньев; в, г — различные конфигурации подвижного блока АР; д — различные конфигурации АР.



Рис. 5. УЗ томография различных по форме СК:

a — с выпуклой; *б* — с цилиндрической поверхностью бетонного изделия; *в* — пневматический прижим АР УЗ томографа к вертикальной стене; *г* — контроль СК с вогнутой поверхностью; *д* — контроль изделия из полимерных материалов.

В адаптивном томографе возможен как ручной прижим АР к неровной поверхности бетона, так и автоматический прижим. Пример прижатия адаптивной АР в ручном режиме к поверхности СК выпуклой и круглой формы показан на рис. 5*a*, *б*, *г*. Кроме того, имеется возможность пневматического прижима адаптивной АР к вертикальным стенам (рис. 5*в*).

Адаптивная АР является неотъемлемой частью УЗ адаптивного томографа, созданного на базе разработанного в МЭИ многофункционального измерительного комплекса (ИК) [16]. ИК состоит из ПК, модулей ЦАП и АЦП, предназначенных для генерации и приема сигналов; усилителей зондирующего и принятого сигналов; коммутатора, позволяющего проводить УЗ контроль изделий в многоканальном режиме, а также контроллеров модулей АР. Также предусмотрена возможность использования различных простых и сложно-модулированных сигналов, в том числе сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ сигнала), у которого оператор может изменять среднюю частоту, девиацию частоты, длительность сигнала, подстраивая их значения под характеристики преобразователей АР и ОК.

Настройка параметров зондирующего сигнала, хранение эхосигналов, их обработка и отображение результатов контроля осуществляется с помощью специализированного ПО через программный пользовательский интерфейс. В ПО также предусмотрен выбор возможной конфигурации АР, соответствующей конфигурации поверхности контролируемых СК. На рис. 6 на фоне томограмм изделия с изображением плоского дна ОК показаны некоторые из заложенных в ПО наиболее типичные конфигурации адаптивной АР, соответствующих плоской (*a*), выпуклой (*б*), вогнутой (*в*) и круглой (овальной) (*г*) поверхности ОК.

Так как конфигурация поверхности в процессе контроля может изменяться, то в ПО предусмотрена возможность подстройки конфигурации адаптивной АР под каждую новую поверхность. При этом автоматически изменяются условия построения томограмм.

На рис. 7 показана схема для расчета томограммы изделия с произвольной поверхностью с помощью алгоритма «фокусировка в точку». На этой схеме показаны излучающий ПЭП с порядковым номером n , который имеет координаты $(x_{ПЭП_n}, y_{ПЭП_n})$, а также один приемный ПЭП антенной решетки с номером m , который имеет координаты $(x_{ПЭП_m}, y_{ПЭП_m})$. Дефект расположен в точке $D_{i,j}$ с

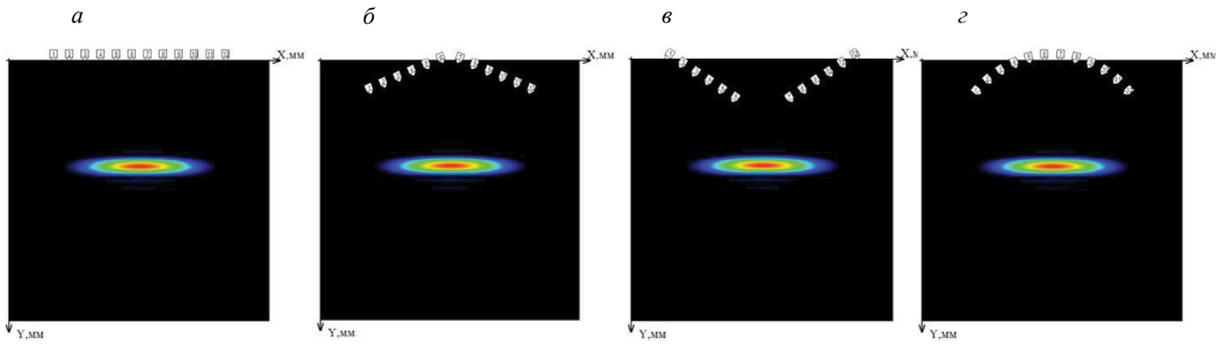


Рис. 6. Выбор возможной конфигурации AP под форму поверхности СК.

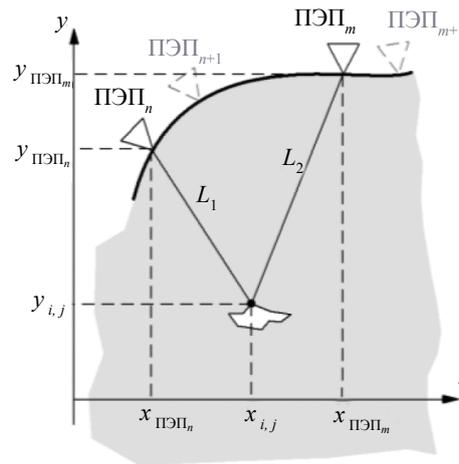


Рис. 7. Принцип синтеза алгоритма «фокусировка в точку» для СК с произвольной поверхностью.

координатами X_i и Y_j . Соответственно УЗ сигнал проходит путь от излучающего преобразователя до дефекта L_1 и путь от дефекта до приемного преобразователя L_2 :

$$L_1 = \sqrt{(x_{i \text{ ПЭП}_n} - x_{i,j})^2 + (y_{i \text{ ПЭП}_n} - y_{i,j})^2}, \tag{1}$$

$$L_2 = \sqrt{(x_{i \text{ ПЭП}_m} - x_{i,j})^2 + (y_{i \text{ ПЭП}_m} - y_{i,j})^2}. \tag{2}$$

Сумма путей $L_\Sigma = L_1 + L_2$, отнесенная к скорости распространения УЗ колебаний C , позволяет определять время прихода УЗ сигнала от предполагаемого отражателя в точке $D_{i,j}$:

$$t_{i,j} = \frac{L_1 + L_2}{C} + t_{\text{зад}}. \tag{3}$$

Имея ансамбль сигналов, определяем амплитуду УЗ сигнала для каждой пары приемного и передающего преобразователя для точки $D_{i,j}$. Если в этой точке присутствует отражатель, то суммарный сигнал от всех пар преобразователей после синфазного сложения будет иметь амплитуду:

$$U_{\Sigma,i,j} = \sum_n \sum_m U_{m,n} \left(\frac{\sqrt{(x_{i \text{ ПЭП}_n} - x_{i,j})^2 + (y_{i \text{ ПЭП}_n} - y_{i,j})^2} + \sqrt{(x_{i \text{ ПЭП}_m} - x_{i,j})^2 + (y_{i \text{ ПЭП}_m} - y_{i,j})^2}}{C} \right). \tag{4}$$

Если в точке $D_{i,j}$ дефект отсутствует, то суммарный сигнал в отсутствии шума равен нулю.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТОМОГРАФИИ ИЗДЕЛИЙ С НЕСТАНДАРТНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

На рис. 8 приведены результаты томографии бетонного цилиндрического блока диаметром 300 мм с отверстием диаметром 50 мм, полученные с помощью УЗ томографа с адаптивной антенной решеткой. Чтобы определить реальные координаты отверстия необходимо определить скорость распространения УЗ волн в бетоне. Скорость поперечной волны, измеренная традиционным способом по скорости поверхностной поперечной волны с горизонтальной поляризацией, составила $C_t = 2000$ м/с, однако на томограмме, построенной для этой скорости (рис. 8б), дефект выявляется недостаточно четко, а его координаты не соответствуют расположению отверстия в цилиндре. Для повышения точности определения координат дефекта был реализован безэталонный способ определения скорости, основанный на использовании алгоритма «фокусировка в точку». На рис. 8 приведены девять двумерных томограмм цилиндрического изделия, полученные при различных значениях расчетной скорости ультразвука. По этим двумерным томограммам достаточно сложно определить ту из них (рис. 8ж), при которой амплитуда эхосигнала от дефекта максимальна. Поэтому истинная скорость ультразвука в бетонном изделии $C_t \approx 2400$ м/с была определена в автоматическом режиме по результатам построения трехмерных томограмм цилиндрического ОК в ИК. Также по трехмерной томограмме, построенной для скорости $C_t \approx 2400$ м/с, были определены координаты отверстия в цилиндрическом бетонном изделии.

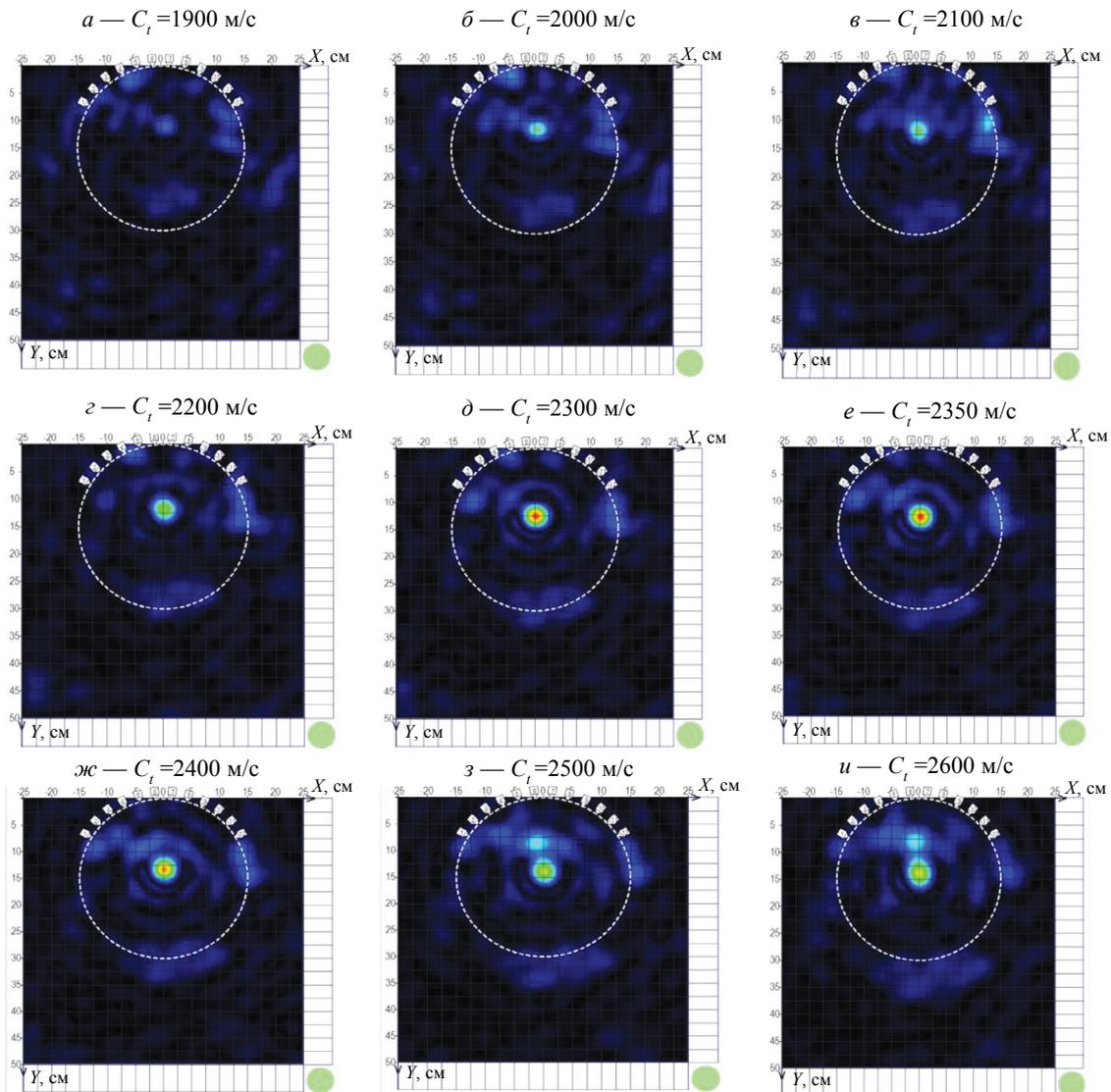


Рис. 8. Томограммы СК, полученные при различных значениях расчетной скорости УЗК.

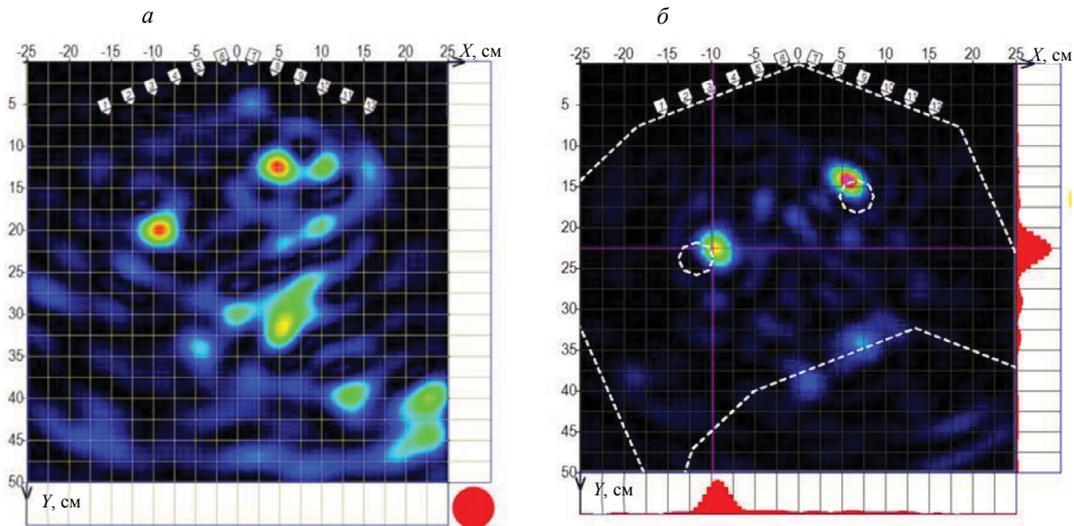


Рис. 9. Результат контроля бетонного ОК с неплоской (выпуклой) поверхностью:
a — томограмма, полученная с использованием измеренного значения скорости поверхностной волны; *б* — томограмма, построенная с использованием значения скорости $C_1 \approx 2400$ м/с, измеренной с помощью алгоритма «фокусировка в точку».

Аналогичным образом были проконтролированы изделия с иными формами поверхности. Так, на рис. 9*a* показаны результаты контроля изображенного на рис. 5*a* бетонного блока «внешним углом», в котором имеются два цилиндрических отверстия диаметром 40 мм. Для этого программным путем задавалась одна из предусмотренных в ПО конфигураций антенны, соответствующая «выпуклой поверхности» (см. рис. 6*б*). Затем определялась скорость ультразвука в бетоне. Вначале производилось измерение скорости поперечных волн по скорости поверхностной волны, однако измеренная таким традиционным способом скорость ультразвука привела к ложным результатам (рис. 9*a*). Использование безэталонного способа измерения скорости УЗ колебаний с помощью алгоритма «фокусировка в точку» позволило получить изображение бетонного изделия с нестандартной поверхностью, которое адекватно отображает его структуру: местоположение границы раздела сред цилиндрических отверстий соответствует их положению в бетонном изделии (рис. 9*б*).

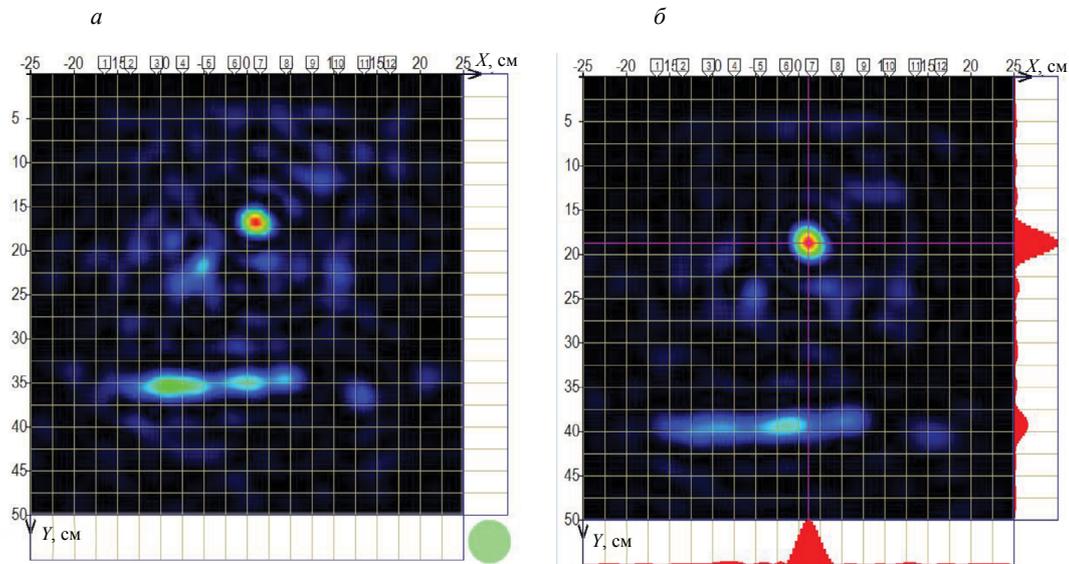


Рис. 10. Томограммы СК с плоской поверхностью толщиной 400 мм с отверстием, расположенным на глубине $h = 200$ мм, построенные при значении скорости поверхностной поперечной волны $C_{t1} = 1550$ м/с, измеренной традиционным методом (*a*), и скорости поверхностной волны $C_2 = 1750$ м/с, измеренной с помощью алгоритма «фокусировка в точку» (*б*).

На рис. 10а показаны результаты томографии ОК с плоской поверхностью (стены, изображенной на рис. 5в) толщиной $H = 400$ мм с дефектом (цилиндрическим отверстием диаметром 50 мм), расположенным на глубине $h = 200$ мм. Сначала для построения томограммы использовалось значение измеренной традиционным способом скорости поверхностной поперечной волны $C_{t1} = 1550$ м/с. На томограмме, показанной на рис. 10а, виден дефект ($h_1 \approx 160$ мм) и донная поверхность ($H_1 = 362$ мм), координаты которых отличаются от известных заранее значений (погрешность измерения составила 9,5 %). На следующем этапе скорость УЗ колебаний в бетоне была определена с помощью алгоритма «фокусировка в точку»: $C_{t2} = 1750$ м/с. На томограмме (рис. 10б), построенной при этой скорости ультразвука, дефект расположен на расстоянии $h_2 \approx 190$ мм, донная поверхность располагается на расстоянии $H_2 = 395$ мм (погрешность составила $\approx 1,3$ %). Таким образом, результаты экспериментов по определению скорости ультразвука подтверждают высокую точность и надежность безэталонного способа измерения скорости ультразвука в бетоне, основанного на использовании алгоритма обработки сигналов УЗ антенной решетки «фокусировка в точку».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большинство приборов УЗ контроля используют проверенные и одновременно простые методы контроля, в которых практически не применяется сложная радиотехническая обработка сигналов. Вместе с тем, современная электронная база позволяет создавать достаточно дешевые, надежные устройства, с помощью которых возможно реализовывать многочисленные алгоритмы обработки сигналов, позволяющие повысить качество контроля изделий. Пример тому — УЗ адаптивный томограф, в котором наряду с использованием адаптивной антенны осуществляется безэталонный способ измерения скорости распространения ультразвука и одновременно координат дефектов и габаритов изделия, а также производится адаптация параметров зондирующих сигналов с целью контроля разнообразных изделий с нестандартной конфигурацией поверхности.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук № МК-1523.2020.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общей редакцией В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
2. Jansohn R., Schickert M. Objective Interpretation of Ultrasonic Concrete Image // NDT.net. December 1998. V. 3. No. 12.
3. Samokrutov A.A., Kozlov V.N., Shevaldykin V.G. Ultrasonic testing of concrete objects using dry acoustic contact. Methods, instruments and possibilities / The 5th International Conference on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry, Moscow, Russia. 2006. V. 152.
4. Schickert M., Krause M. Ultrasonic Techniques for Evaluation of Reinforced Concrete Structures / In: C. Maierhofer, H.-W. Reinhardt, G. Dobmann (Eds.). Non-destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures. V. 2. Non-destructive Testing Methods. Cambridge: Woodhead, 2010. P. 490—530.
5. Paris O., Brédif Ph., Roy O. Study of phased array techniques for cracks characterization in concrete structures / International Symposium Non Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 411—448 September 2003.
6. Mielentz F. Phased Arrays for Ultrasonic Investigations in Concrete Components // J. Nondestruct. Eval. 2008. V. 27. P. 23—33. DOI: org/10.1007/s10921-008-0032-6
7. Качанов В.К., Соколов И.В., Концов Р.В. et al. Using «Focusing to a Point» Algorithm for Reference-Free Measurement of the Speed of Ultrasound in Tomography of Concrete Engineering Structures // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 6. P. 443—452. [Качанов В.К., Соколов И.В., Концов Р.В., Тимофеев Д.В. Использование алгоритма «фокусировка в точку» для безэталонного измерения скорости ультразвука при томографии строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 20—29.]
8. Введение в технологию применения ультразвуковых фазированных антенных решеток / Перевод: к.т.н. С.В. Реука. СПб.: СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2011. 210 с.
9. Кондратенков Г.С., Потехин В.А., Реутов А.П., Феоктистов Ю.А. Радиолокационные станции обзора Земли. М.: Радио и связь, 1983.
10. <http://www.acsys.ru/production/>

11. *Kachanov V.K., Kartashev V.G., Sokolov I.V.* Ultrasonic Tomograph of Concrete Building Structures with Lateral Signal Radiation // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 2. P. 110—118. [*Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Концов Р.В., Трунов Э.И.* Ультразвуковой томограф бетонных строительных конструкций с боковым излучением сигнала // Дефектоскопия. 2020. № 2. С. 12—20.]
12. *Качанов В.К., Соколов И.В., Тимофеев Д.В., Туркин М.В., Шалимова Е.В.* Обнаружение отражающих плоскостей при ультразвуковой томографии строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2010. № 5. С. 36—44.
13. *Шевалдыкин В.Г.* О безэталонном измерении толщины изделий с переменной по глубине скорости звука // Дефектоскопия. 1986. № 3. С. 20—22.
14. *Качанов В.К., Соколов И.В., Концов Р.В., Синицын А.А.* Использование антенных решеток для безэталонного измерения скорости ультразвука и толщины бетонных изделий // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 26—33.
15. *Шевалдыкин В.Г., Самокрутов А.А., Козлов В.Н.* Ультразвуковые низкочастотные пьезопреобразователи с сухим точечным контактом и их применение для неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2003. № 2. С. 30—39.
16. *Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Концов Р.В., Федоров М.Б.* Ультразвуковая адаптивная многофункциональная дефектоскопия. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 175с.

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНО-ВИБРОМЕТРИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗДУШНО-СВЯЗАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

© 2021 г. Д.А. Дерусова^{1,*}, В.П. Вавилов^{1,**}, В.О. Нехорошев^{2,***}, В.Ю. Шпильной^{1,****},
Н.В. Дружинин^{3,*****}

¹Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск, ул. Савиных, 7

²Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия 634055 Томск, пр. Академический, 2/3

³Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия 634050 Томск, пр. Академический, 2/4

E-mail: *red@tpu.ru; **vavilov@tpu.ru; ***credence@ytomske.ru;

****vshpilnoy@list.ru; *****mikola@sibmail.com

Поступила в редакцию 15.11.2021; после доработки 22.11.2021

Принята к публикации 23.11.2021

Лазерная доплеровская виброметрия нашла применение как в неразрушающем контроле (НК) полимерных композиционных материалов (ПКМ), так и в исследованиях амплитудно-частотных характеристик акустических излучателей в широком спектре частот. Использование воздушно-связанных систем для возбуждения акустических колебаний в исследуемых объектах позволяет осуществлять процедуру контроля качества бесконтактно. Это расширяет возможности диагностики композитов, упрощает процедуру контроля качества и минимизирует внешние воздействия на контролируемые объекты по сравнению с традиционными акустическими методами НК на основе контактных излучателей.

В настоящей работе исследованы особенности НК композитов бесконтактным способом с применением сканирующей лазерной виброметрии. Приведены результаты НК ударных повреждений в ПКМ с использованием нескольких типов воздушно-связанных систем возбуждения акустических колебаний, а именно, на основе пьезоэлектрического, магнитострикционного и газоразрядного преобразователей.

Ключевые слова: акустика, ультразвук, лазерная доплеровская виброметрия, пьезоэлектрический преобразователь, искровой разряд, термоакустика, магнитострикционный излучатель, неразрушающий контроль, композиционные материалы.

DOI: 10.31857/S0130308221120034

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитострикционные и пьезоэлектрические (ПЭП) преобразователи, состоящие из одного или нескольких электромеханических преобразователей, концентраторов и волноводов, нашли широкое применение в неразрушающем контроле (НК). Конфигурация излучателей позволяет реализовать диагностические устройства, способные обеспечить стабильный акустический сигнал с требуемыми параметрами. Однако, ввиду существенного различия акустического импеданса воздушной среды и исследуемых твердых материалов, для эффективной передачи ультразвука, как правило, используют соединительные среды. На практике это усложняет техническое исполнение устройств, увеличивает стоимость и длительность процедуры диагностики и ограничивает номенклатуру материалов и изделий, подлежащих контролю качества. Более того, после проведения дефектоскопии с использованием соединительной среды необходима постобработка поверхности объектов исследования для их очистки от иммерсионной жидкости с последующей просушкой.

Появление воздушно-связанных ультразвуковых (УЗ) систем в начале 1980-х годов [1—3] привело к разработке новых способов УЗ контроля, которые в настоящее время составили конкуренцию традиционным УЗ системам в различных областях применений [4, 5]. Важной особенностью бесконтактных систем возбуждения является исключение влияния присоединенной массы и отсутствие необходимости использовать жидкий, твердый или гелеобразный иммерсионный слой для ввода акустического сигнала в исследуемый материал [6].

Преимущества бесконтактных УЗ преобразователей способствовали увеличению числа научных исследований в указанной области и разработке новых воздушно-связанных УЗ систем и методов НК, которые различаются по принципу действия и методам генерации УЗ волн в воздушной среде [7—11]. В частности, исследование воздушно-связанных магнитострикционных преобразователей продемонстрировало эффективность работы устройств в сборке с титановыми волноводами различной конфигурации. Согласование магнитострикционного излучателя с нагрузкой при помощи акустических волноводов позволяет повысить мощность полезного акустического

сигнала, однако при этом отмечено снижение достоверности результатов контроля по мере удаления излучателя от контролируемого объекта, что в принципе характерно для бесконтактных систем резонансного типа [12, 13].

В работах [8, 9] приведены характеристики газоразрядных (электротермоакустических, термоакустических) излучателей, в которых акустические колебания возбуждаются в результате теплового расширения газа вследствие протекания тока электрического разряда. Показано, что излучатели отличаются широким частотным диапазоном генерируемых акустических сигналов (до единиц МГц) и могут создавать импульс избыточного давления порядка 136 дБ на расстоянии до 0,4 м [8, 9]. В настоящее время газоразрядные излучатели находятся на стадии разработки, в то время как ПЭП применяют в коммерческих диагностических системах с воздушно-связанным возбуждением [7, 8]. В частности, в работе [7] показана возможность использования роботизированных систем для проведения контроля качества изделий со сложной геометрией.

Таким образом, актуальны разработки как устройств для бесконтактной акустической стимуляции, так и методик НК для их практического применения. Цель настоящей работы — анализ особенностей проведения НК слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) бесконтактным способом при использовании лазерной доплеровской виброметрии и воздушно-связанных систем возбуждения на основе пьезоэлектрического, магнитострикционного и газоразрядного преобразователей.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Независимо от типа системы возбуждения, лазерно-виброметрический НК заключается в регистрации и дальнейшем анализе вибраций на поверхности исследуемого материала, возникающих в процессе акустической стимуляции. Схема лабораторной установки для проведения НК композиционных материалов на основе лазерной доплеровской виброметрии с использованием различных воздушно-связанных УЗ преобразователей приведена на рис. 1.

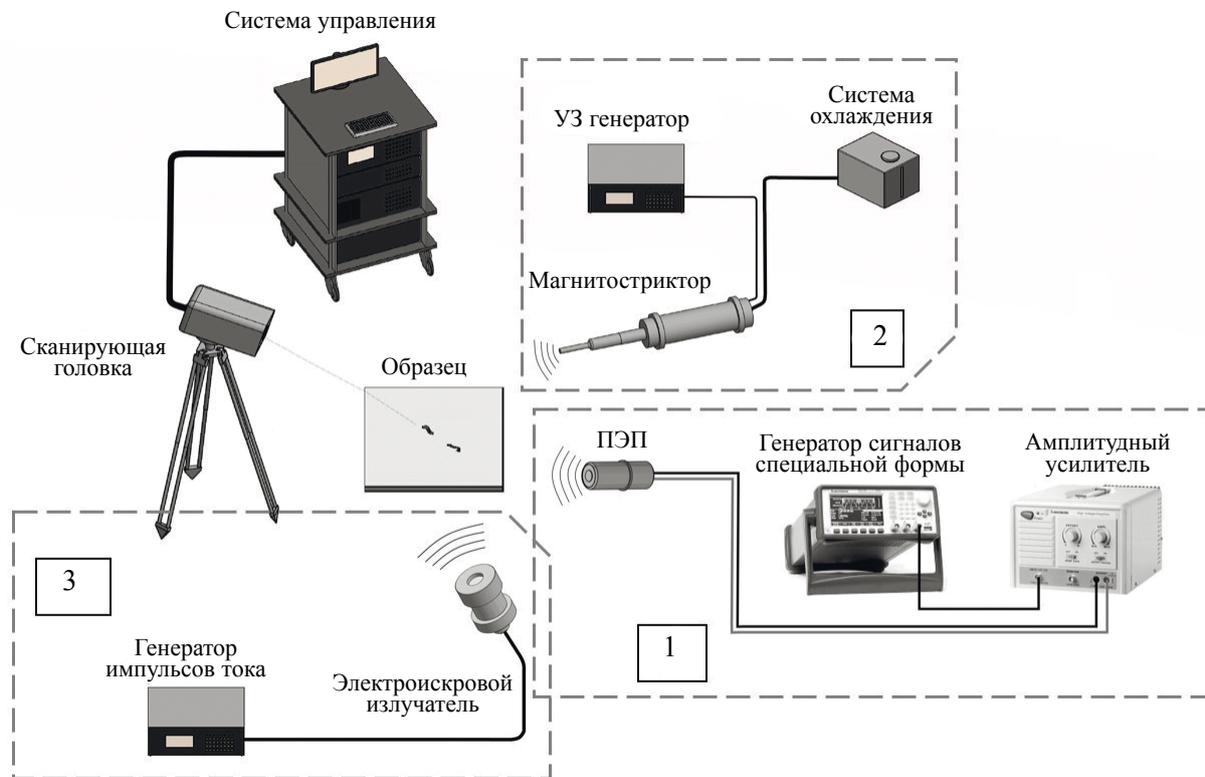


Рис. 1. Лабораторная установка для НК композиционных материалов методом лазерной виброметрии с воздушно-связанной системой возбуждения акустических колебаний (1 — с пьезоэлектрическим преобразователем; 2 — на основе магнитостриктора; 3 — на основе газоразрядного излучателя).

Лабораторная установка включает в себя сканирующую лазерную головку и систему управления доплеровского виброметра PSV-500-3D-HV (Polytec). Результатами сканирования являются амплитудно-частотный спектр вибраций в каждой точке исследуемой поверхности, а также виброграммы, отражающие распределение амплитуды виброперемещения или виброскорости на поверхности излучателей и контролируемого изделия. Анализ амплитудно-частотного спектра вибраций позволяет обнаружить структурные неоднородности исследуемых материалов. В частности, наличие дефектных включений приводит к локальному уменьшению жесткости материала, что проявляется в виде резонансного пика на характерной частоте амплитудно-частотного спектра [14—16].

Эксперименты выполняли с различными системами бесконтактной акустической стимуляции на основе УЗ излучателей и генераторов электрических сигналов специальной формы. Контроль качества ПКМ осуществляли путем анализа колебаний на поверхности изделий, возникающих в результате их акустической стимуляции. Измерение вибраций проводили в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц в режиме быстрого преобразования Фурье. Количество спектральных линий составило 3200, что позволило измерить амплитудно-частотный спектр вибраций в каждой точке сканирования с шагом по частоте 31 Гц, а также определить резонансные частоты и формы колебаний объектов контроля. Шаг сканирования области, включавшей 150×150 точек, был равен 2 мм.

В состав Блока 1 входил воздушно-связанный пьезокерамический излучатель (Ultran ACU, США, собственная резонансная частота 110 кГц) и генератор сигналов специальной формы AWG-4163 с усилителем AWA-1810 (Актаком, Россия). В ходе эксперимента для возбуждения пьезоэлемента использовали сигнал синусоидальной формы. Амплитуда напряжения на пьезоэлементе не превышала 150 В и была ограничена тепловым режимом работы излучателя.

Блок 2, показанный на рис. 1, представлял собой воздушно-связанную систему возбуждения на основе магнитострикционного преобразователя. В состав системы входили магнитостриктор (резонансная частота $22 \pm 1,65$ кГц, номинальная мощность $0,63 \pm 10$ % кВт) с цилиндрическим ступенчатым волноводом, ультразвуковой генератор USG-2-22-MS-1 с функцией автоматической подстройки частоты (диапазон рабочих частот 14—48 кГц, выходная мощность до 2 кВт) и специализированная система охлаждения установки.

Блок 3 представлял собой разработанную авторами систему генерации акустических колебаний, состоящую из генератора импульсов тока, передающей линии и газоразрядного излучателя, функционирующего на основе искрового разряда в воздухе. Принцип действия системы заключается в использовании скачка давления в газоразрядном промежутке, возникающего при резком нагреве и расширении области плазмы разряда вследствие протекания импульса электрического тока. Упрощенная схема устройства генерации акустических колебаний на основе импульсного разряда в газе показана на рис. 2. Конструктивная особенность излучателя состоит в том, что объем газоразрядного промежутка отделен от окружающей среды посредством упругой мембраны 4, которая, с одной стороны, является частью обратного токопровода, а с другой — выполняет функцию излучающей поверхности.

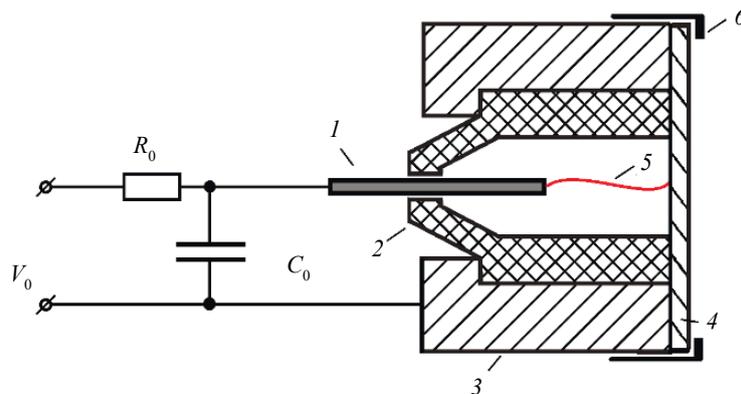


Рис. 2. Схема устройства генерации акустических колебаний на основе искрового разряда:
1 — активный электрод, 2 — изолятор, 3 — корпус (обратный токопровод), 4 — мембрана, 5 — разрядный канал (величина межэлектродного зазора до 12 мм), 6 — прижимной фланец.

Газоразрядный излучатель работает следующим образом. При подаче импульса тока от генератора межэлектродная емкость C_0 заряжается через токоограничительный резистор R_0 . При определенном напряжении в газоразрядном промежутке между электродами 1 и 4 происходит пробой и формируется канал искрового разряда, схематично изображенный на рис. 2 как позиция 5. Образованию и расширению области плазмы разряда сопутствует скачок давления, распространяющийся в объеме газоразрядного промежутка. Под действием скачка давления мембрана 4 отклоняется от положения равновесия. Смещение мембраны и ее релаксационные колебания провоцируют генерацию акустических волн в окружающей среде. По мере разряда емкости C_0 напряжение на газоразрядном промежутке снижается и в определенный момент времени становится недостаточным для поддержания плазмы. Происходит рекомбинация плазмы и обрыв тока через газоразрядный промежуток. Ввиду того, что длительность электрических процессов не превышает нескольких микросекунд, спектр излучаемых колебаний определяется, в основном, частотными характеристиками используемой излучающей поверхности и конструктивными особенностями газоразрядного излучателя.

В данной работе использованы электрод из стали 1 диаметром 1 мм и мембрана 4, представляющая собой алюминиевый диск диаметром 30 мм и толщиной 1 мм. Разряд возбуждали от специализированного генератора, создававшего выходное напряжение $V_0 < 12$ кВ и ток короткого замыкания на уровне 800 А при частоте следования импульсов до 4 Гц.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Лазерная виброметрия композиционных материалов с использованием воздушно-связанного ПЭП

На рис. 3 показаны образец из ПКМ с ударным повреждением и воздушно-связанная система для акустической стимуляции на основе ПЭП, входившая в состав Блока 1 лабораторной установки (см. рис. 1). Для возбуждения ПЭП был использован гармонический сигнал. Мощность сигнала в ходе работы регулировали путем изменения амплитуды выходного напряжения генератора. Для исследования частотных характеристик излучателя был выполнен эксперимент с варьированием частоты выходного сигнала при постоянной амплитуде выходного напряжения. В ходе работы было определено амплитудное значение виброперемещения на торце излучателя, которое составило 10 мкм при входном напряжении генератора $U = 70$ В и частоте переменного тока $f = 113$ кГц.



Рис. 3. Акустическая стимуляция углепластикового композита с использованием воздушно-связанной системы на основе ПЭП (расстояние от излучателя до дефекта 10 мм, размеры образца 270×40×1,2 мм).

В результате лазерного сканирования углепластикового композита с ударным повреждением были получены виброграммы (рис. 4).

Приведенные виброграммы отображают вибрации на поверхности углепластикового композита, возникающие на частоте резонанса дефекта (ударного повреждения) — 113,3 кГц. Амплитуда скорости вибраций в области ударного повреждения составила $V_D = 6,19$ мм/с, что более чем в 7 раз превосходит амплитуду скорости вибраций $V_0 = 0,87$ мм/с в бездефектной зоне. Длина рас-

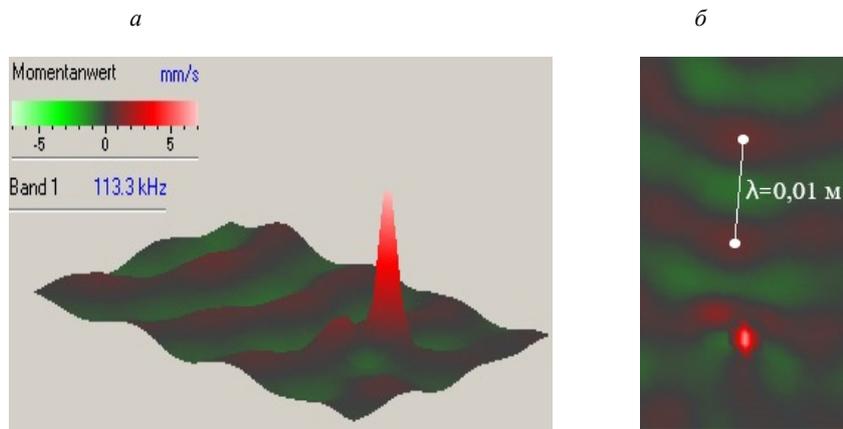


Рис. 4. Виброграммы углепластикового композита на частоте резонанса дефекта в 3D- (а) и 2D- (б) представлениях.

пространяющейся в пластине акустической волны составляла приблизительно $\lambda = 0,01$ м, что соответствовало скорости распространения ультразвука в композите $c = \lambda \times f = 1133$ м/с.

С учетом плотности углепластика $\rho = 1560$ кг/м³ была оценена акустическая мощность, переносимая звуковой волной через поперечную площадку ($S = 0,048 \times 10^{-3}$ м²), расположенную перпендикулярно направлению распространения звука [14]: $P_{ac} = \frac{\rho \times V_0^2 \times c \times S}{2} = 31$ мкВт.

Аналогичным образом была рассчитана акустическая мощность излучателя при изменении уровня напряжения от 10 до 70 В. На основе полученных данных была выявлена зависимость амплитуды виброскорости в области дефекта и в бездефектной зоне от уровня акустической мощности воздушно-связанного ПЭП при постоянной частоте стимулирующего сигнала (рис. 5), которая составляла 113,3 кГц, что соответствовало резонансу воздушно-связанной системы, образованной излучателем, окружающей средой, исследуемым образцом и дефектом на его поверхности.

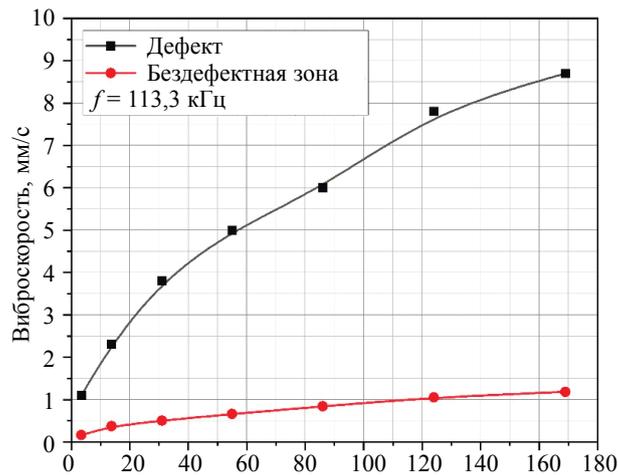


Рис. 5. Зависимость амплитуды виброскорости в области дефекта и в бездефектной зоне от уровня акустической мощности воздушно-связанного ПЭП.

Как видно из рис. 5, при увеличении акустической мощности до 170 мкВт амплитуда колебаний в области ударного повреждения возрастала от 1,1 до 8,7 мм/с. В бездефектной области также наблюдалось увеличение амплитуды сигнала от 0,2 до 1,2 мм/с соответственно. Чувствительность системы диагностики будем характеризовать соотношением V_D/V_0 , где V_D и

V_0 — амплитуды виброскорости в дефектной и бездефектной областях соответственно. При изменении акустической мощности от 30 до 170 мкВт данный критерий составил $V_D/V_0 \approx 7$. Следовательно, если достигаются механические резонансы в дефектной области, то чувствительность системы позволяет надежно регистрировать резонансные пики амплитудно-частотного спектра, связанные с наличием дефекта.

Важно отметить, что отклонение частоты передаваемого в материал акустического сигнала также оказывает существенное влияние на величину V_D/V_0 , что иллюстрируется рис. 6. В настоящем исследовании частоту сигнала возбуждения f варьировали при постоянной амплитуде выходного напряжения генератора U , в результате чего была получена частотная характеристика чувствительности системы.

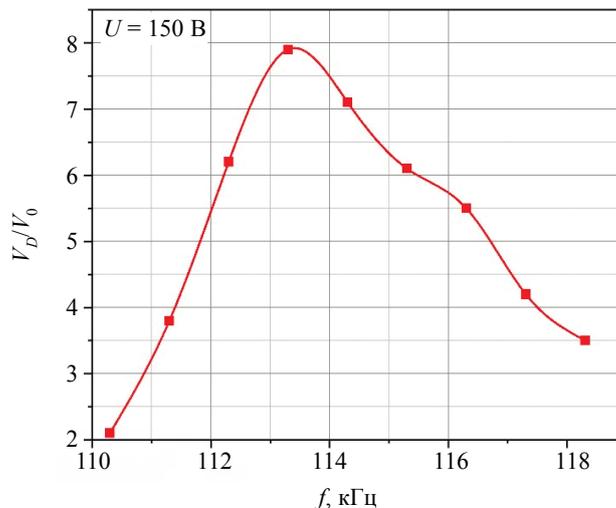


Рис. 6. Частотная характеристика чувствительности системы НК в области резонансного режима работы воздушно-связанной системы ПЭП (амплитуда напряжения на выходе генератора $U = 150$ В).

Из рис. 6 видно, что при согласовании частоты стимулирующих акустических волн с частотой резонанса ударного повреждения 113,3 кГц наблюдается увеличение относительной амплитуды вибраций в области дефекта до $V_D/V_0 \approx 8$, однако при относительном отклонении частоты на уровне нескольких процентов амплитуда полезного сигнала резко падает.

Таким образом, показана возможность обнаружения дефектов при вводимой акустической мощности на уровне десятков мкВт, однако это возможно только при условии, что в области структурных неоднородностей достигаются локальные резонансы. Резонансная УЗ стимуляция с использованием воздушно-связанных ПЭП позволяет обнаруживать дефекты в виде ударных повреждений в ПКМ, однако необходимость точного согласования частоты стимулирующих акустических волн с частотой резонанса дефекта существенно ограничивает их применение в НК материалов и изделий.

3.2. Лазерная виброметрия композиционных материалов с использованием воздушно-связанного магнитоотричного излучателя

Недавние исследования воздушно-связанных излучателей на основе магнитоотричных УЗ преобразователей продемонстрировали возможность их применения в НК, но это достигается преимущественно за счет значительной мощности используемых устройств [17]. Модернизация конструкции волноводов для магнитоотричных излучателей повысила эффективность передачи акустической энергии в исследуемый образец. В частности, использование бесконтактного магнитоотричного излучателя позволило обнаружить ударное повреждение в углепластиковом композите, а также идентифицировать избыточное содержание клея и наличие воды в сотовых авиационных панелях [12].

В настоящей работе была исследована возможность использования воздушно-связанных излучателей на основе УЗ преобразователей магнитоотричного типа для обнаружения ударного

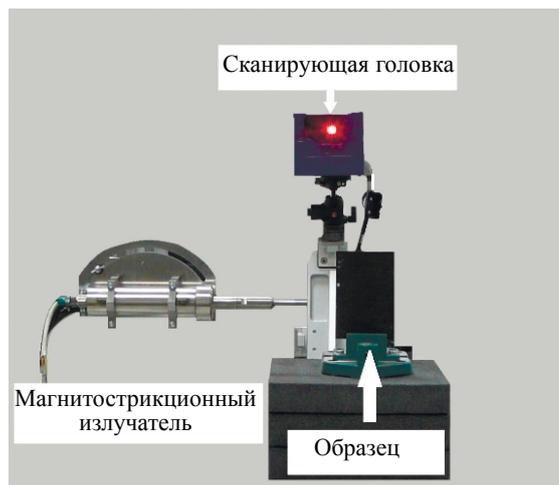


Рис. 7. Установка для НК углепластикового композита с использованием воздушно-связанного магнитострикционного излучателя.

повреждения в тонком углепластиковом композите. Схема эксперимента приведена на рис. 1 (Блок 2), фотография экспериментальной установки приведена на рис. 7.

Система возбуждения обеспечивала бесконтактную УЗ стимуляцию на резонансной частоте магнитострикционного излучателя, создавая области разрежения и сжатия в воздушной среде. Более подробно процедура измерения вибраций в воздухе с использованием лазерного виброметра описана в работе [12]. Амплитудное значение виброперемещения на торце волновода составляло 30 мкм. Виброграмма, отражающая процесс распространения УЗ волны в воздухе от магнитострикционного излучателя, показана на рис. 8.

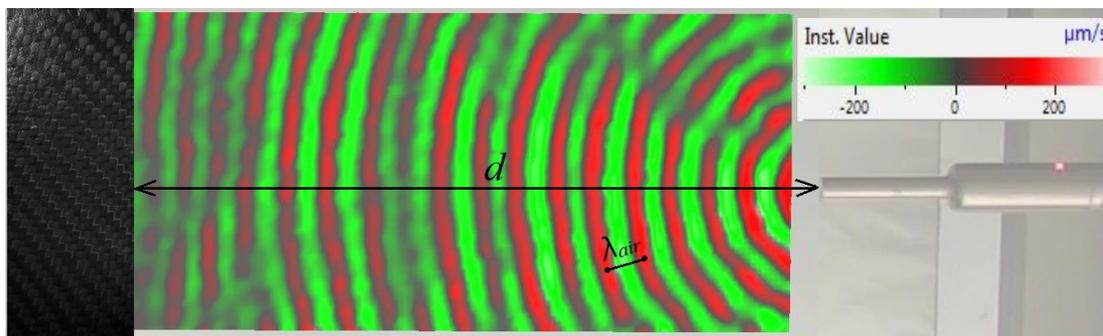


Рис. 8. Виброграмма распространения в воздухе УЗ волны, генерируемой магнитострикционным преобразователем.

При резонансной УЗ стимуляции в воздушной среде между излучателем и объектом контроля происходит наложение падающей на объект контроля и отраженной от него УЗ волн в соответствии с принципом суперпозиции. Возникающие интерференционные явления могут привести как к увеличению амплитуды колебаний в результирующей волне, так и к ее снижению [18]. В работе [19] показано, что регулирование воздушного зазора (d) между излучателем и исследуемым материалом существенно изменяет эффективность передачи ультразвука. Подобные явления в принципе характерны для воздушно-связанных систем возбуждения непрерывного действия. Например, на рис. 9 приведен график распределения амплитуды вибраций, возникающих в воздушной среде между торцом волновода магнитострикционного излучателя и объектом в форме пластины.

Из рис. 9 видно, что амплитуда виброскорости УЗ волны в воздухе спадает неравномерно, поскольку именно интерференция падающей и отраженной волн определяет амплитуду результирующего сигнала. Исходя из теоретических представлений, для достижения оптимального согла-

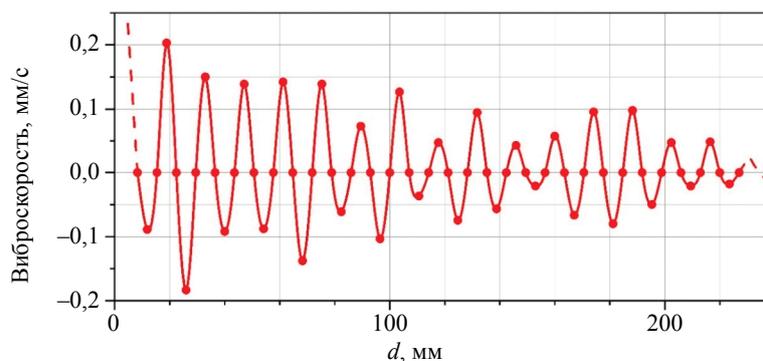


Рис. 9. Распределение амплитуды виброскорости в воздушной среде на различных расстояниях d между излучателем и исследуемым объектом (частота 23 кГц, длина волны 14,3 мм).

сования системы величина воздушного зазора должна быть кратна половине длины акустической волны (λ_{air}), распространяющейся в воздушной среде. Таким образом, условие согласования можно записать в виде $d = n \times \lambda_{air} / 2$, где $n \in N$, что физически означает условие согласования по фазе колебаний в образовавшейся стоячей волне. Это условие подтверждается экспериментально. На рис. 9 показано, что при частоте сигнала возбуждения 23 кГц длина волны составляет 14,3 мм и пучности (локальные максимумы амплитуды виброскорости) располагаются на расстояниях, кратных половине длины волны от торца волновода.

Из вышесказанного следует, что расстояние между контролируемым объектом и воздушно-связанным преобразователем должно выбираться так, чтобы одновременно обеспечить необходимый уровень амплитуды сигнала возбуждения и фазовую синхронизацию в системе. Важно отметить, что указанные особенности являются общими при работе всех типов резонансных излучателей, как магнитострикционных, так и пьезоэлектрических [20—22].

С помощью метода лазерной виброметрии были измерены вибрации, возникающие на поверхности углепластикового композита в процессе УЗ магнитострикционной стимуляции. Для обеспечения фазовой синхронизации величину воздушного зазора между объектом контроля и излучателем в конкретном эксперименте выбирали равной 21 мм, что соответствовало $3\lambda_{air} / 2$. На рис. 10 показаны виброграммы, полученные при сканировании на фронтальной ($a, б$) и тыльной ($в, г$) поверхностях образца из углепластика с ударным повреждением.

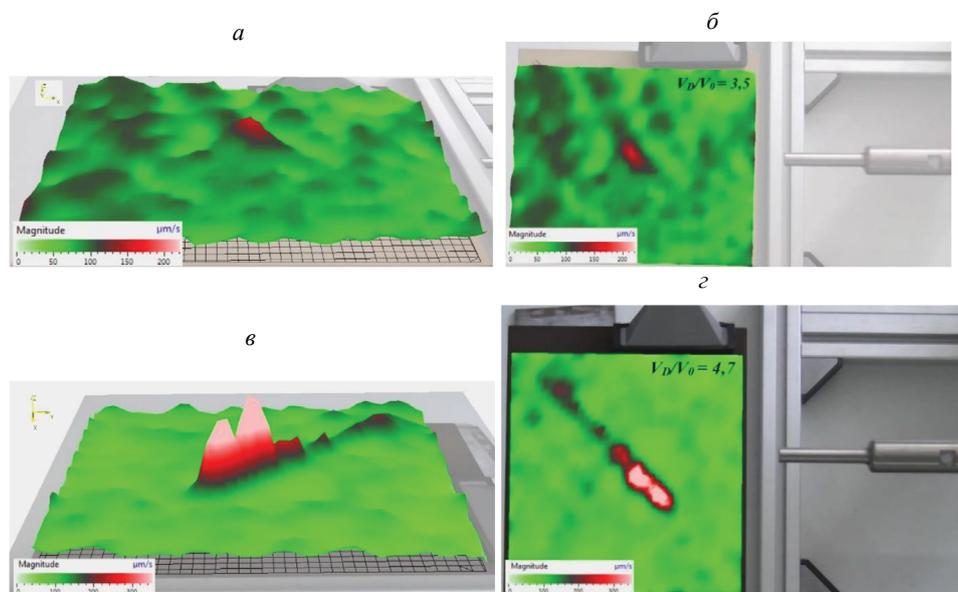


Рис. 10. Виброграммы на фронтальной ($a, б$) и тыльной ($в, г$) поверхностях образца из углепластика, полученные при акустической стимуляции с использованием воздушно-связанного магнитострикционного излучателя (размер образцов $155 \times 175 \times 1,5$ мм, ударное повреждение с энергией 18 Дж — в центре образца).

В результате анализа данных, полученных с помощью лазерной виброметрии, была оценена площадь зоны повреждения. На фронтальной стороне исследуемого образца площадь дефектной зоны составила 950 мм^2 , что меньше оценки, полученной при сканировании тыльной поверхности (1550 мм^2). Относительная амплитуда сигнала в области дефекта, измеренная по виброграмме на фронтальной стороне, составила $V_D/V_0 \approx 4$, в то время как на тыльной поверхности $V_D/V_0 \approx 5$. Такое различие, по-видимому, связано с пирамидальной структурой ударного повреждения в слоистом композите, то есть возрастанием площади повреждения по мере увеличения глубины залегания дефекта (детально структура такого дефекта была рассмотрена в [23]).

Экспериментально было показано, что использование воздушно-связанного магнитоэлектрического излучателя для бесконтактной акустической стимуляции позволяет обнаружить дефекты в ПКМ даже без предварительного анализа резонансных частот объекта. В частности, полученный результат был достигнут путем использования мощных преобразователей, работающих на постоянной частоте ультразвука. Однако применение мощных излучателей ограничивается из-за возможности повреждения элементов исследуемого изделия вследствие локального резонанса или УЗ нагрева. Помимо этого, использование ультразвука с высокой плотностью мощности предъявляет дополнительные требования к оборудованию рабочего места и квалификации операторов.

Важно отметить, что для непрерывного возбуждения с помощью воздушно-связанных систем характерны интерференционные явления в пространстве между излучателем и объектом контроля, поэтому необходимо обеспечивать фазовую синхронизацию падающей на объект контроля и отраженной от него акустических волн, что затрудняет диагностику.

3.3. Лазерная виброметрия композиционных материалов с использованием воздушно-связанного газоразрядного излучателя

На рис. 11 показана фотография воздушно-связанной системы для акустической стимуляции гибридного образца ПКМ «лен—углерод» с использованием газоразрядного излучателя.

Система для генерации акустических колебаний в воздушной среде (Блок 3 на рис. 1) включала в себя газоразрядный излучатель, передающую линию и генератор импульсов тока. В отличие от систем возбуждения, рассмотренных выше, газоразрядный излучатель работает в импульсном режиме, поэтому в воздушно-связанной системе между излучателем и объектом контроля не формируется устойчивая стоячая волна. Следовательно, при данном способе возбуждения нет необходимости обеспечивать согласование акустических колебаний по фазе.

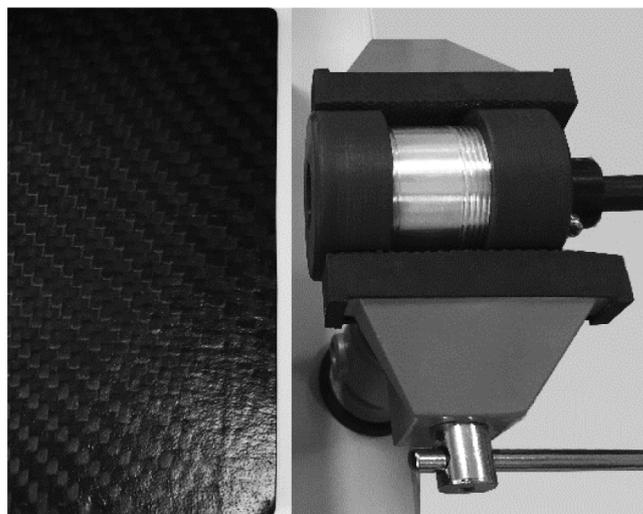


Рис. 11. Акустическая стимуляция гибридного образца «лен—углерод» с ударным повреждением с помощью воздушно-связанной системы на базе газоразрядного излучателя (размер образца $150 \times 100 \times 4 \text{ мм}$, ударное повреждение с энергией 40 Дж — в центре образца).

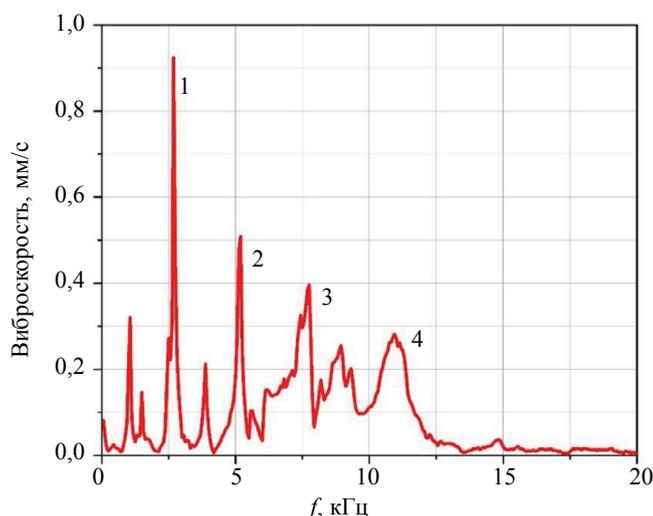


Рис. 12. Спектр вибросигнала в области ударного повреждения гибридного ПКМ «лен—углепластик».

В ходе предварительных экспериментов с использованием лазерной виброметрии была изменена амплитуда виброперемещения в центре мембраны газоразрядного излучателя. При величине межэлектродного промежутка 7 мм и выходном напряжении генератора импульсов тока до $V_0 < 12$ кВ амплитуда виброперемещения поверхности мембраны достигала 27 мкм, что сопоставимо по порядку величины с виброперемещением излучающих поверхностей систем на основе магнитострикционного и пьезоэлектрического преобразователей. Ввиду различных факторов, связанных с особенностями протекания разряда в излучателе, амплитуда излучаемой мощности нестабильна от импульса к импульсу. Относительный разброс амплитуды виброперемещения поверхности мембраны достигал 20 %, однако это не приводило к значительным искажениям виброграммы при лазерном сканировании.

При проведении НК гибридного ПКМ («лен—углепластик») газоразрядный излучатель размещали на расстоянии 20 мм от торцевой стороны композита. В результате лазерного вибросканирования был получен амплитудно-частотный спектр вибраций пластины, приведенный на рис. 12.

Амплитудно-частотный спектр отображает вибрации на поверхности гибридного композита в области ударного повреждения. В диапазоне частот от 50 Гц до 12 кГц в амплитудно-частотном спектре были обнаружены пики, часть из которых относилась к собственным частотам композита (1, 2), а другие соответствовали резонансным частотам дефекта в области ударного повреждения (3, 4). Виброграммы, отображающие вибрации поверхности гибридного композита на характерных резонансных частотах (1—4), приведены на рис. 13.

Рис. 13а показывает пример виброграммы на собственной частоте гибридного композита (4,56 кГц), не содержащей дефектную отметку. При соответствии частоты передаваемого в материал акустического сигнала частоте резонанса дефекта в области неоднородности возникают интенсивные локальные вибрации. На частотах 7,69 кГц (см. рис. 13в) и 11,56 кГц (см. рис. 13г) были обнаружены резонансные вибрации в области двух частей ударного повреждения, напоминающих известные «крылья бабочки». Вовлечение в процесс колебаний большей области дефекта объясняется увеличением длины упругой волны, распространяющейся в композите в вышеуказанном диапазоне частот. Мелкие участки неоднородностей в свою очередь проявляются на более высокой частоте стимулирующих акустических волн. В связи с этим, размер области дефекта был определен в результате анализа виброграммы, полученной при усреднении амплитуды вибраций в диапазоне частот от 50 Гц до 20 кГц (см. рис. 14а).

Для подтверждения результатов лазерной виброметрии в качестве альтернативного метода НК было проведено УЗ С-сканирование с использованием роботизированного дефектоскопа Ideal System 3D (Германия) [24]. Для возбуждения колебаний на частоте 15 МГц использовали специализированный ПЭП диаметром 16 мм. Результаты УЗ сканирования с шагом 1 мм были наложены на фотографию исследуемого гибридного композита (см. рис. 14б). Определенная по результатам виброметрии площадь дефекта составила 800 мм², или 95 % от величины, полученной по результатам С-сканирования.

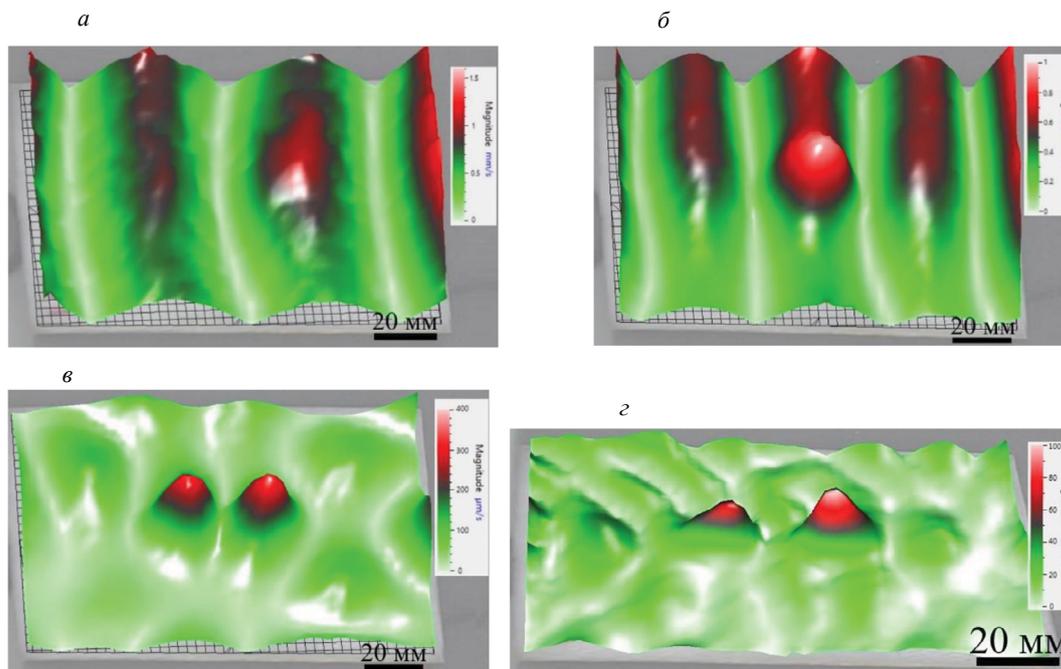


Рис. 13. Оценка ударного повреждения энергией 40 Дж в гибридном композите «лен—углепластик» путем анализа собственных частот образца (a —2,69 кГц; $б$ —5,19 кГц) и резонансных частот дефекта ($в$ —7,69 кГц; $г$ —11,56).

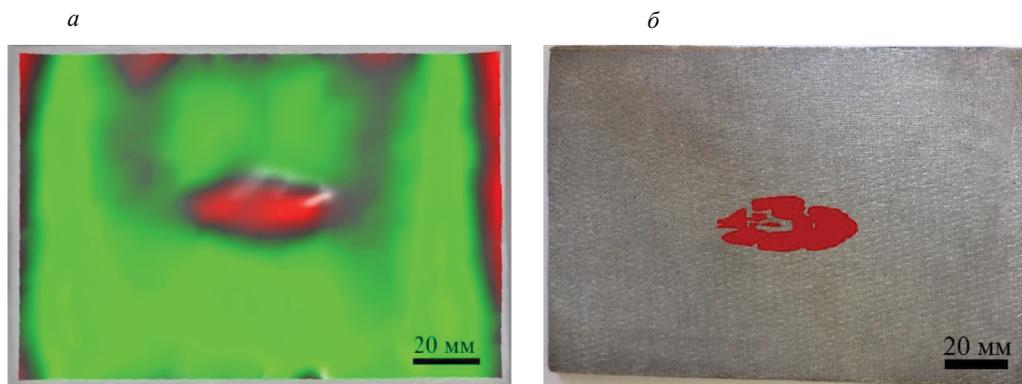


Рис. 14. Сравнительный анализ оценки размеров ударного повреждения в гибридном композите «лен—углепластик» с использованием лазерной виброметрии (a) и УЗ сканирования ($б$).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования выявлены особенности проведения процедуры НК слоистых ПКМ, характерные для различных воздушно-связанных систем возбуждения акустического сигнала. В частности, использование ПЭП, работающего в резонансном режиме, обеспечивает обнаружение дефектов при вводимой акустической мощности на уровне десятков мкВт. Однако в данном случае необходимым условием является соответствие частоты стимулирующих акустических волн частоте резонанса дефекта, что требует проведения предварительного частотного анализа. Преимуществами ПЭП является их технологичность и относительная простота конструкции, тем не менее получение с их помощью мощного широкополосного акустического сигнала, пригодного для бесконтактного возбуждения дефектов в слоистых ПКМ, остается сложной задачей.

Лазерное вибросканирование с использованием воздушно-связанного магнитострикционного излучателя позволило обнаружить ударное повреждение в углепластиковом композите без пред-

варительного анализа резонансных частот дефекта. Это объясняется высокой мощностью вводимого ультразвука, а также наличием высших гармоник и нелинейных явлений, расширяющих спектральный состав сигнала возбуждения.

Общей особенностью систем возбуждения, работающих в непрерывном режиме, является наличие интерференционных явлений в пространстве между излучателем и объектом исследования. Это определяет необходимость обеспечения фазового согласования падающей и отраженной волн в воздушно-связанной системе.

Лазерное вибросканирование углепластикового композита с использованием газоразрядного излучателя обеспечивает широкополосную акустическую стимуляцию объектов контроля, что позволяет проводить спектральный анализ акустического отклика дефектов на частотах до 20 кГц. К особенностям воздушно-связанной системы на основе газоразрядного излучателя следует отнести импульсный режим работы, при котором в воздушном пространстве между излучателем и объектом контроля не формируется стоячая волна. Таким образом, при данном способе возбуждения нет необходимости обеспечивать согласование акустических колебаний по фазе, что является одним из важных преимуществ газоразрядного излучателя по сравнению с другими типами УЗ преобразователей.

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что использование бесконтактного режима ввода и регистрации акустического сигнала расширяет возможности диагностики ПКМ и минимизирует внешние воздействия на контролируемые объекты по сравнению с традиционными акустическими методами НК на основе контактных преобразователей. Однако использование бесконтактных излучателей имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при проведении НК.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК — 221.2021.4 (результаты по магнитострикционному излучателю), гранта РФФИ № 21-79-00169 (результаты по газоразрядному излучателю) и Госзадания «Наука» № 5.0017.ГЗБ.2020 (методика контроля качества). Авторы выражают благодарность профессору И.Ю. Солодову (Штуттгартский Университет, Германия) за оказанную помощь при проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yano T., Tone M., Fukumoto A.* 1 MHz Ultrasonic Transducer Operating in Air / In: A.J. Berkhout, J. Ridder, and L.F. van der Wal. Eds. *Acoustical Imaging*. Boston, MA: Springer US, 1985. P. 575—584.
2. *Schiller S., Hsieh C.K., Chou C., Khuri-yakub B.* Novel high frequency air transducers / Review of progress in quantitative NDE, 1990, 795.
3. *Hutchins D.A., Schindel D.W.* Advances in non-contact and air-coupled transducers // Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium. 1993. V. 2. P. 1245—1254. DOI: 10.1109/ULTSYM.1994.401811
4. *Chen J., Wang X., Yang X., Zhang L., Wu H.* Application of air-coupled ultrasonic nondestructive testing in the measurement of elastic modulus of materials // Applied Sciences. 2021. V. 11. Is. 19. Article number 9240. DOI: 10.3390/app11199240
5. *Adelegan O.J., Coutant Z.A., Wu X., Yamaner F.Y., Oralkan O.* Design and Fabrication of Wideband Air-Coupled Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers with Varying Width Annular-Ring and Spiral Cell Structures // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2021. V. 68. Is. 8. P. 2749—2759. DOI: 10.1109/TUFFC.2021.3076143
6. *Bernhardt Y., Kreutzbruck M.* Integrated defect sensor for the inspection of fiber-reinforced plastics using air-coupled ultrasound // Journal of Sensors and Sensor Systems. 2021. V. 9. Is. 1. P. 127—132. DOI: 10.5194/jsss-9-127-2020
7. *Marhenke T., Neuenschwander J., Furrer R., Zolliker P., Twiefel J., Hasener J., Wallaschek J., Sanabria S.J.* Air-Coupled Ultrasound Time Reversal (ACU-TR) for Subwavelength Nondestructive Imaging // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2020. V. 67. Is. 3. P. 651—663. DOI: 10.1109/TUFFC.2019.2951312
8. *Daschewski M., Kreutzbruck M., Prager J., Dohse E., Gaal M. und Harrer A.* Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall // Technisches Messen. 2015. V. 82 (3). P. 156—66.
9. *Gaal M., Kotschate D.* New technologies for air-coupled ultrasonic transducers // proceedings of 12th ECNDT conference, 2018, Gothenburg, Sweden. Author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/325685745>
10. *Migachev S.A., Kurkin M.I., Smorodinskii Y.G.* Noncontact excitation of sound in metals by a video pulse of electric field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. No. 11. P. 653—6561.
11. *Kachanov V.K., Sokolov I.V., Karavaev M.A., Kontsov R.V.* Selecting Optimum Parameters of Ultrasonic Noncontact Shadow Method for Testing Products Made of Polymer Composite Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 10. P. 831—842.

12. *Derusova D.A., Vavilov V.P., Druzhinin N.V., Kolomeets N.P., Chulkov A.O., Rubtsov V.E., Kolu-baev E.A.* Investigating vibration characteristics of magnetostrictive transducers for air-coupled ultrasonic NDT of composites // *NDT and E International*. 2019. V. 107. DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.102151
13. *Shpil'noi V.Yu., Vavilov V.P., Derusova D.A., Druzhinin N.V., Yamanovskaya A.Yu.* Specific Features of Nondestructive Testing of Polymer and Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Excitation and Laser Vibrometry // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 8. P. 647—655.
14. *Solodov I., Bernhardt Y., Kreuzbruck M.* Resonant airborne acoustic emission for nondestructive testing and defect imaging in composites // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. Is. 21. Article number 10141. DOI: 10.3390/app112110141
15. *Solodov I., Dillenz A., Kreuzbruck M.* A new mode of acoustic NDT via resonant air-coupled emission // *Journal of Applied Physics*. 2017. V. 121. Is. 2428. Article number 245101.
16. *Schmerr L.W., Song S.-J.* *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems*. 1st ed. Boston: Springer, 2007.
17. *Guo X., Zhu L.* Vibro-thermography of calibrated defects in hybrid plates focusing on viscoelastic heat generation // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2020. Article in press. DOI: 10.1080/17686733.2020.1771528
18. *Solodov I., Döring D., Busse G.* Air-Coupled Lamb and Rayleigh Waves for Remote NDE of Defects and Material Elastic Properties // *Strojniski Vestnik / Journal of Mechanical Engineering*. 2010. V. 56. Is. 9. P. 557—564.
19. *Blum R.* Verfahren zur Erkennung von Spaltern in Span- und MDF-Platten und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens, DE Patent 19519669C1, Germany, 1997.
20. *Pyl'nov Yu.V., Shirkovskiy P.N., Pernod Ph., Preobrazhensky V.L.* Ultrasonic air-coupled wave phase conjugator for the low megahertz frequency range // *Proceedings — IEEE Ultrasonics Symposium*. 2009. Article number 5441902. P. 2611—2614.
21. *Li X., Dai Z., Zhang G., Zhang S., Jeong H.* Determining the Responsivity of Air-Coupled Piezoelectric Transducers Using a Comparative Method: Theory and Experiments // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2021. V. 68. Is. 10. P. 3114—3125. DOI: 10.1109/TUFFC.2021.3084756
22. *Wu Q., Chen Q., Lian G., Wang X., Song X., Zhang X.* Investigation of an air-coupled transducer with a closed-cell material matching strategy and an optimization design considering the electrical input impedance // *Ultrasonics*. 2021. V. 115. Article number 106477. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106477
23. *Yang J.-S., Ma L., Chaves-Vargas M., Huang T.-X., Schröder K.-U., Schmidt R., Wu L.-Z.* Influence of manufacturing defects on modal properties of composite pyramidal truss-like core sandwich cylindrical panels // *Composites Science and Technology*. 2017. V. 147. P. 89—99. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.05.007
24. *Dolmatov D., Zhvyrblyya V., Sednev D.* The development of post-processing algorithm for the ultrasonic evaluation by the application of automated robotic testing systems// *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1019. Is. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012006

СЕЛЕКТИВНЫЙ МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ И СТЕПЕНИ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА СТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ

© 2021 г. А.В. Бызов^{1,*}, Д.Г. Ксенофонтов^{1,**}, В.Н. Костин¹, О.Н. Василенко¹

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

E-mail: *byzovav@imp.uran.ru; **ksenofontov@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 23.09.2021; после доработки 24.09.2021

Принята к публикации 24.09.2021

Исследованы зависимости локально измеряемых магнитных характеристик поверхностно упрочненных стальных объектов от толщины и физических свойств их поверхностных слоев. Теоретически и экспериментально показано, что изменение толщины упрочненного слоя на поверхности стальных объектов в наибольшей степени влияет на величину тангенциальной составляющей поля на поверхности объекта в межполюсном пространстве, а изменение прочностных свойств слоя — на величину магнитного потока в цепи «преобразователь—объект». Это различие магнитных параметров предложено использовать для селективного контроля качества поверхностного упрочнения. Показано, что локально измеряемая по внутреннему полю коэрцитивная сила и максимальная величина магнитного потока, которые могут быть измерены в одном измерительном цикле с помощью единственного преобразователя, могут быть использованы в качестве диагностических параметров.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, слой, сердцевина, моделирование, коэрцитивная сила, магнитный поток, аппаратно-программная система магнитной структуроскопии.

DOI: 10.31857/S0130308221120046

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностное упрочнение стальных изделий является широко распространенным способом повышения их износостойкости и сопротивления усталостному разрушению [1—4]. Толщина поверхностно упрочненных слоев может варьироваться в очень широких пределах: 0,2—1,0 мм — после лазерного нагрева; 1,5—3 мм — для конструкций, подвергаемых усталостному износу; 3—7 мм — для различных деталей машиностроения и автомобилестроения; 10—20 мм и более — для изделий, которые должны выдерживать повышенные контактные нагрузки (например, катки гусеничной техники, валки холодной прокатки).

Наиболее известными методиками определения толщины упрочненного слоя являются акустические [5—7], вихретоковые [8, 11] и магнитные [9—18]. Акустические методики используются при наличии выраженной границы между упрочненным слоем и сердцевиной и толщине слоя больше длины ультразвуковой волны. Вихретоковые — для определения малых (1—2 мм и менее) толщин поверхностного упрочнения.

Наибольшее практическое применение нашла коэрцитиметрическая методика определения толщины и прочности (твердости) поверхностно упрочненных слоев, основанная на локальном измерении средней по промагниченному объему коэрцитивной силы H_c с помощью преобразователей различных типоразмеров [9—12, 14]. Используемые преобразователи обеспечивают различную глубину промагничивания испытуемого изделия. Для отдельного определения глубины и толщины слоя в зоне контроля необходимо выполнять два измерения величины H_c . Сначала проводят измерение с помощью преобразователя с малой глубиной промагничивания, а результат говорит о твердости упрочненного слоя. Затем проводят измерение величины H_c с помощью преобразователя с большой глубиной промагничивания и по полученному результату с учетом показаний первого преобразователя судят о толщине упрочненного слоя. Таким образом, коэрцитиметрический контроль упрочнения является достаточно трудоемкой и продолжительной процедурой. Кроме того, использование двух преобразователей различных размеров увеличивает погрешности контроля, связанные с несовпадением зон намагничивания и различной чувствительностью используемых преобразователей к таким мешающим факторам, как неконтролируемый зазор в измерительной цепи или перекосящий преобразователя относительно поверхности контролируемого объекта.

Вследствие очевидных недостатков коэрцитиметрической методики на протяжении многих лет велись разработки альтернативных магнитных методик контроля качества поверхностного упрочнения. Для повышения чувствительности к глубине слоя было предложено частично размагничивать

вать остаточного намагниченного по предельной петле гистерезиса двуслойный объект постоянным или переменным полем [15] или несколькими сериями импульсов магнитного поля [16]. Однако амплитуда и временные характеристики таких полей могут сильно различаться и оптимальные алгоритмы перемагничивания должны подбираться экспериментально для каждого типоразмера контролируемых объектов, что сильно затрудняет практическое применение этих методик.

В работах [17, 18] предложены методика и устройства определения параметров упрочненного слоя, основанные на перемагничивании объектов по предельной петле гистерезиса и измерении полей, при которых наблюдаются максимумы дифференциальной магнитной проницаемости. Поскольку поле максимума дифференциальной проницаемости материала практически совпадает с его коэрцитивной силой, то по этим полям можно определять качество (твердость) этих слоев. Но к настоящему времени отсутствуют методики и устройства для локального измерения полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости.

Существующие методики и средства измерений предполагают последовательное определение глубины и прочности поверхностных слоев с помощью существенно различающихся методик и устройств. Трудоемкость и стоимость такого контроля даже выше, чем у коэрцитиметрического. Таким образом, актуальной задачей остается разработка достаточно простой и достоверной методики селективного определения параметров упрочненных слоев на ферромагнитных изделиях. Разработка такой методики является задачей настоящей работы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ

В нашей работе [19] путем численного решения методом конечных элементов системы уравнений Максвелла [20] с использованием программы FEMM [21] было установлено, что при увеличении толщины упрочненного слоя (d) меняется соотношение магнитных потоков, проходящих между полюсами электромагнита по упрочненному слою и сердцевине, и увеличивается глубина проникновения магнитного потока, создаваемого приставным U-образным электромагнитом при фиксированной величине намагничивающего тока. Магнитный поток в слое монотонно увеличивается в несколько раз, что приводит к монотонному росту тангенциальной составляющей поля H_x в межполюсном пространстве на поверхности двуслойного стального объекта. Увеличение d также приводит к монотонному уменьшению нормальной компоненты магнитного потока в полюсе электромагнита B_y . Уменьшение твердости поверхностного слоя, сопровождающееся увеличением его магнитной проницаемости, увеличивает значения B_y . Таким образом, различная чувствительность величин H_x и B_y к изменению толщины и магнитных свойств упрочненного слоя может быть физической основой для селективной оценки качества поверхностного упрочнения стальных изделий.

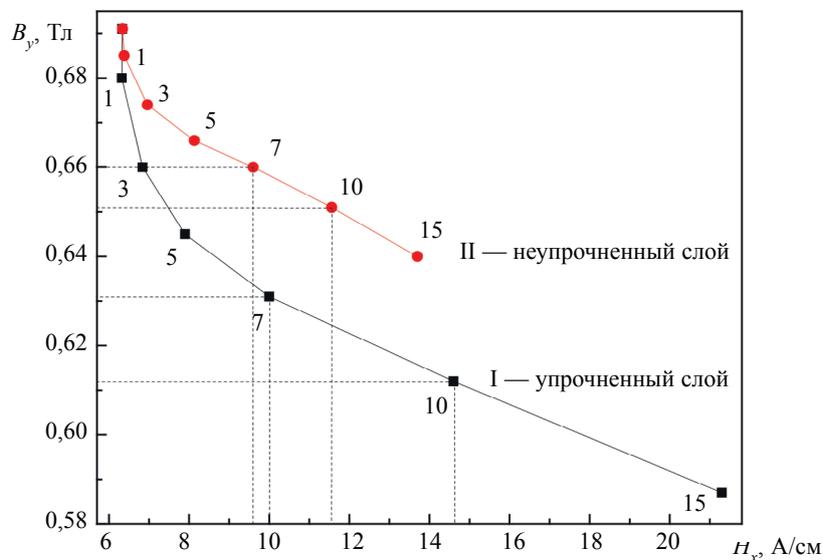


Рис. 1. К пояснению алгоритма селективной оценки качества поверхностного упрочнения при одностороннем ограничении толщины слоя.

На рис. 1 приведены полученные по данным работы [19] значения поля H_x и индукции B_y для различных глубин упрочненного (кривая I) и неупрочненного (кривая II) слоев. Покажем, что эти данные могут быть использованы для селективной оценки качества поверхностного упрочнения.

На практике толщина упрочненного слоя может иметь либо одностороннее ограничение (задается минимальная допустимая толщина слоя), либо двустороннее (задается диапазон допустимых значений толщины слоя).

Одностороннее ограничение глубины снизу. Допустим, что минимальная глубина слоя должна равняться 10 мм. Тогда, в соответствии с кривой I, должно быть 14,6 А/см, 0,612 Тл. Если глубина слоя нормальная, а сам слой имеет пониженную твердость (из-за недогрева при закалке или недостаточно быстром охлаждении), то его магнитные свойства будут соответствовать кривой II, т. е. при том же значении толщины будет 0,612 Тл. Если 14,6 А/см, а соответствующие значения лежат на кривой I или ниже, то это означает пониженную глубину слоя с нормальной твердостью. Если пониженным значениям соответствуют повышенные значения (т.е. экспериментальные значения лежат между кривыми I и II), то это свидетельствует о пониженной глубине слоя и его недостаточном упрочнении.

Аналогичные результаты получаются и для других заданных глубин слоя. На рис. 1 также приведен пример для заданной величины слоя 7 мм.

Однако указанный выше алгоритм имеет ограничение на диапазон оцениваемых слоев. Как видно из рис. 1, начальные участки зависимостей I и II практически сливаются при слое около 1 мм, при этом достаточное для использования различие зависимостей I и II существует при глубинах упрочненного слоя 3 мм и больше.

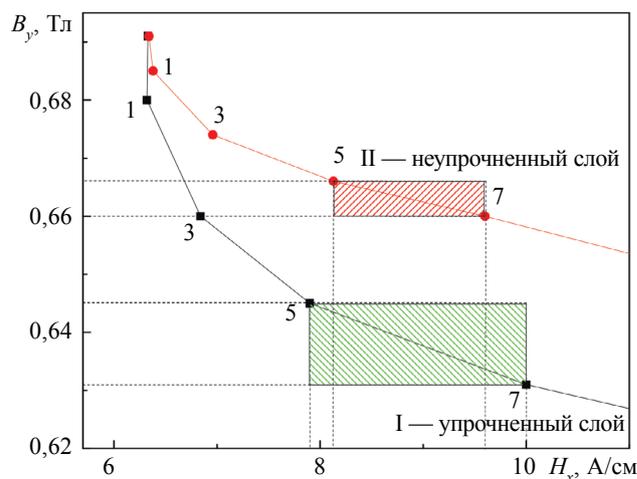


Рис. 2. К пояснению алгоритма селективной оценки качества поверхностного упрочнения при двустороннем ограничении толщины слоя.

Двустороннее ограничение глубины. В этом случае глубина слоя должна укладываться в определенный интервал. Пусть допустимая глубина нормально упрочненного слоя лежит в пределах $5 \leq d_{\text{упр}} \leq 7$ мм. Тогда, как показано на рис. 2, измеренные магнитные параметры должны соответствовать нижней заштрихованной области на плоскости (H_x, B_y) .

Если глубина слоя находится в допустимых пределах, но слой является неупрочненным, то измеренные магнитные параметры должны соответствовать верхней заштрихованной области на рис. 6. Если значения измеренных магнитных параметров соответствуют области между линиями I и II, но вне заштрихованных областей, то это означает несоответствие слоя заданным требованиям ни по глубине, ни по степени упрочнения.

Однако, как видно из рис. 1 и 2, начальные участки зависимостей I и II практически сливаются при слое около 1 мм, при этом достаточное для практического использования различие зависимостей I и II существует при толщинах упрочненного слоя 3 мм и больше. Таким образом, описанные выше алгоритмы селективного определения толщины и прочности могут быть использованы при толщине слоя 3 мм и более.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для экспериментальной проверки описанной выше методики селективного определения толщины и прочности поверхностного слоя был изготовлен моделирующий магнитомягкую сердцевину прямоугольный параллелепипед из отожженной стали 3 с размерами $23,3 \times 34,5 \times 97$ мм и коэрцитивной силой 2,1 А/см, а также набор пластин из закаленной стали 60С2А различной толщины с площадью $40,5 \times 90,7$ мм и коэрцитивной силой 32,5 А/см, с помощью которого варьировалась толщина упрочненного слоя. Измерение указанных выше параметров H_x и B_y было выполнено с помощью магнитного мультитестера ММТ-3, который позволяет локально измерять предельную петлю магнитного гистерезиса [22, 23]. На рис. 3 приведены рассчитанные в [19] и экспериментально определенные зависимости параметров H_x и B_y от толщины упрочненного слоя d . Видно хорошее качественное совпадение расчета и эксперимента, что подтверждает возможность практического применения параметров H_x и B_y для селективной оценки качества поверхностного упрочнения с использованием одного измерительного преобразователя и единственного цикла измерений. Однако вопрос об оптимальности предлагаемых параметров остается открытым.

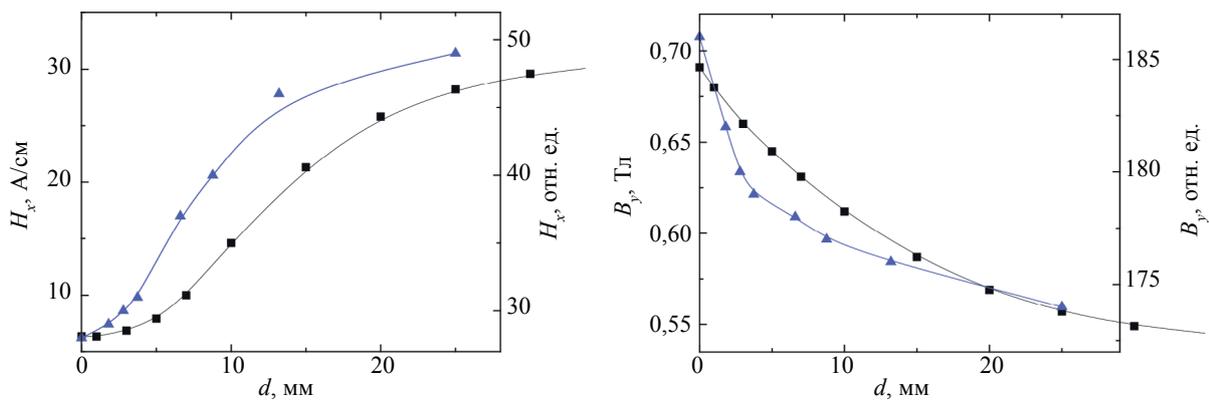


Рис. 3. Расчетные (■) и экспериментальные (▲) зависимости параметров H_x и B_y от глубины упрочненного слоя.

Использование дополнительного магнитного параметра позволяет придать новые возможности коэрцитиметрическому контролю. На рис. 4 приведена зависимость показаний I_{H_c} коэрцитиметра КИФМ-1 с U-образным электромагнитом и сечением полюсов 12×28 мм [9–12] от толщины упрочненного слоя, который был имитирован пластинами различной толщины и обладающих различной твердостью и магнитными свойствами. При увеличении толщины слоя

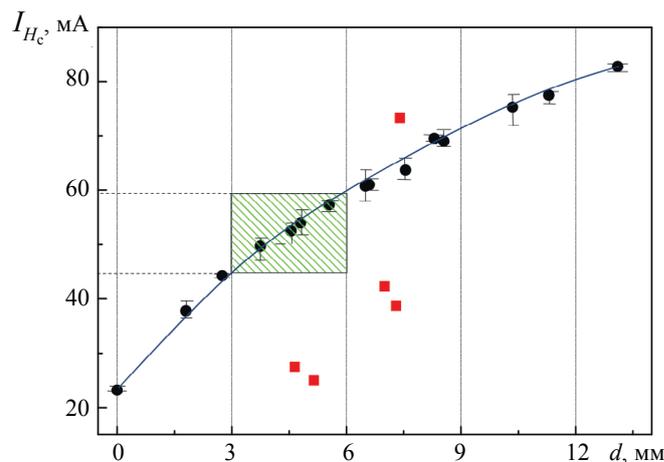


Рис. 4. Зависимость показаний коэрцитиметра КИФМ-1 от толщины нормально упрочненных (●), а также отличающихся по магнитным свойствам (■) поверхностных слоев на магнитомягкой сердцевине.

от 0 до 13 мм величина I_{H_c} возрастает в 4 раза. При этом видны значительные отклонения показаний от градуировочной кривой для поверхностных слоев с отличающимися магнитными свойствами. Покажем, что учет дополнительного параметра, аналогичного по чувствительности величине B_y , позволяет отделить такие слои от нормально упрочненных (закаленных) слоев.

На рис. 5 для того же набора образцов приведена зависимость измеренного с помощью аппаратно-программной системы DIUS-1.15M [23] максимального магнитного потока Φ_m . По аналогии с измерениями с помощью прибора КИФМ-1 измерения величины Φ_m выполнены с помощью датчика с U-образным электромагнитом и сечением полюсов 12×28 мм. Видно, что, как и указанная выше величина B_y , магнитный поток монотонно падает при увеличении толщины нормально упрочненных слоев. При увеличении толщины слоя до 13 мм величина Φ_m уменьшается на 11 %.

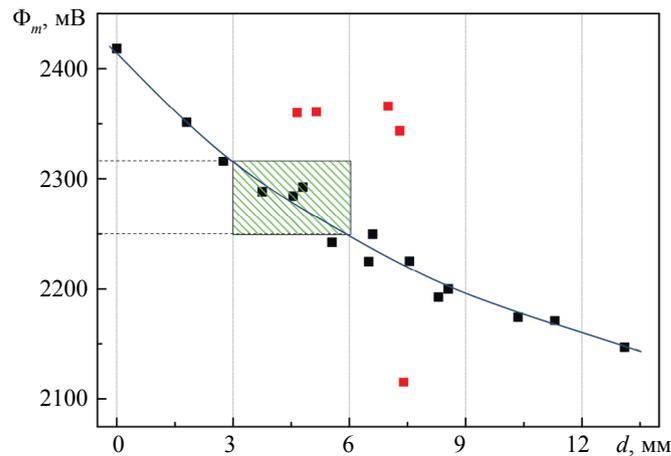


Рис. 5. Зависимость величины максимального магнитного потока в измерительной цепи «преобразователь—объект» от толщины нормально упрочненных (■) и отличающихся по магнитным свойствам (■) поверхностных слоев на магнитомягкой сердцевине.

Пусть допустимый диапазон толщин составляет (3—6) мм. В случае нормально упрочненных слоев, имеющих допустимые значения толщины, измеренные значения величин I_{H_c} и Φ_m должны одновременно попадать в заштрихованные на рис. 4 и рис. 5 области. Выпадающим из этих областей двум образцам соответствуют пониженные значения I_{H_c} и завышенные значения Φ_m , что свидетельствует об их недостаточном поверхностном упрочнении. Аналогичные результаты получаются и для других диапазонов толщины слоя. Таким образом, селективный контроль качества поверхностного упрочнения может быть реализован с помощью двух таких параметров, как I_{H_c} и Φ_m .

Однако для измерения параметров I_{H_c} и Φ_m были использованы различные измерительные устройства. Актуальным является вопрос о параметрах, измеряемых одним и тем же устройством. Для определения такой возможности с помощью АПС DIUS-1.15M на тех же образцах была определена зависимость измеряемой по внутреннему магнитному полю [24] величины коэрцитивной силы H_c от толщины поверхностно упрочненных слоев. Результаты приведены на рис. 6. Видно, что полученная зависимость во многом напоминает представленную на рис. 4 зависимость коэрцитивной силы, измеренной по размагничивающему току, однако при $d \leq 2$ мм чувствительность величины H_c к толщине слоя меньше, чем чувствительность величины I_{H_c} . В то же время зависимость $H_c(d)$ полностью соответствует приведенной на рис. 3 зависимости $H_x(d)$. Таким образом, при толщине упрочненных слоев более 2-3 мм двухпараметровая селективная методика оценки качества поверхностного упрочнения может быть практически реализована с использованием параметров H_c и Φ_m , которые могут быть измерены аппаратно-программной системой DIUS-1.15M [23, 24] в одном измерительном цикле с помощью одного преобразователя. Общее время измерения указанных параметров не превышает 10 с.

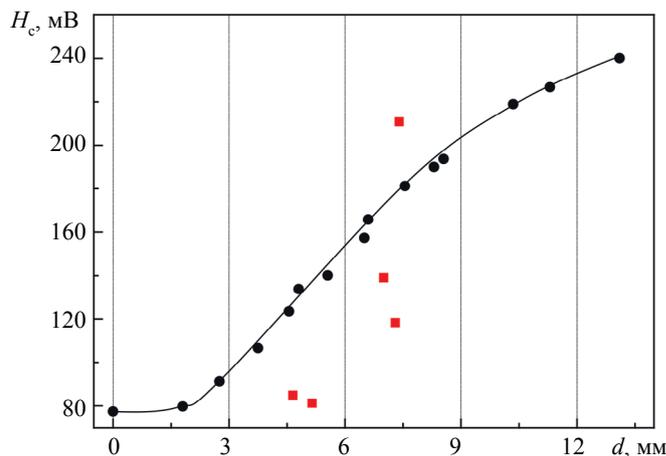


Рис. 6. Зависимость локально измеренной по внутреннему полю коэрцитивной силы от толщины нормально упрочненных (■) и отличающихся по магнитным свойствам (●) поверхностных слоев на магнитомягкой сердцевине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически и экспериментально показано, что тангенциальная компонента внутреннего поля в межполюсном пространстве U-образного электромагнита H_x и нормальная компонента магнитного потока B_y имеют различные чувствительности к изменению толщины и физических свойств упрочненного слоя на стальных объектах, что является физическим основанием новой методики селективной оценки качества поверхностного упрочнения стальных изделий. Предложен алгоритм селективной оценки толщины слоя и степени его упрочнения, предполагающий одновременное попадание значений диагностических параметров в заранее заданные интервалы. В качестве диагностических параметров предложено использовать локально измеряемые значения коэрцитивной силы H_c и потока в цепи «преобразователь—объект» Φ_m , которые могут быть измерены с помощью аппаратно-программной системы DIUS-1.15M или других аналогичных устройств.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of hard coating, deposition technologies, properties and applications / Ed. by R.F. Bunshah, Noyes Publications, 2001.
2. Surface Hardening of Steels, Understanding the Basics / Ed. by J.R. Davis, ASM International, 2002.
3. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин / Учебное пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. 64 с.
4. Wagha Santoshkumar V., Bhattb Dhananjay V., Menghanic Jyoti V., Bhavikattid Shivnanda S. Effects of laser hardening process parameters on hardness depth of Ck45 steel using Taguchi's optimization technique / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 810. P. 012027. IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/810/1/012027
5. Баев А.Р., Майоров А.Л., Тищенко М.А. Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий // Литье и металлургия. 2010. № 4. С. 267—271.
6. Baqeri R., Honarvar F., Mehdizad R. Case depth profile measurement of hardened components using ultrasonic backscattering method / 18th World Conference on Nondestructive Testing. Durban, South Africa, April, 16—20, 2012.
7. Salchak Y.A., Sednev D.A., Kroening M., Ardashkin I.B. Method of case hardening depth testing by using multifunctional ultrasonic testing instrument // Materials Science and Engineering. 2015. № 81. С. 1—8.
8. Cuffe J., Sun H., Plotnikov Y., Nath Sh., Sheila-Vadde A. Eddy current measurement of case hardened depth of steel components / 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, October, 25—28, 2008.
9. Буда Г.В., Мухеев М.Н., Костин В.Н. Определение размеров приставного электромагнита, предназначенного для неразрушающего контроля глубины и твердости поверхностно-упрочненных слоев // Дефектоскопия. 1984. № 8. С. 10—16.

10. Мухеев М.Н., Бида Г.В., Костин В.Н., Михайлова А.А. Контроль глубины и твердости закаленных с нагрева ТВЧ слоев на шейках коленчатого вала автомобиля // Дефектоскопия. 1985. № 8. С. 12—17.
11. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. 266 с.
12. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2000. № 10. С. 3—28.
13. Lo C.C.H., Kinser E.R., Jiles D.C. Magnetic non-destructive characterization of case depth in surface-hardened steel components / Presented at: Quantitative Nondestructive Evaluation, Brunswick, ME, USA, 31 July — 5 August 2005. AIP Conference Proceedings. V. 820. P. 1253—1260.
14. Муриков С.А., Артемьев И.А., Муриков Е.С., Кудряшов А.А., Урцев В.Н., Ничипурук А.П., Сташков А.Н. Возможности коэрцитиметрии для диагностики технического состояния валков стана горячей прокатки // Сталь. 2011. V. 11. P. 68—70.
15. Горкунов Э.С., Лapidус Б.М., Валтышева И.А. Устойчивость магнитных состояний двуслойных ферромагнетиков к воздействию постоянного и переменного магнитных полей // Дефектоскопия. 1986. № 4. С. 77—84.
16. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А. Способ контроля качества поверхностно-упрочненного слоя изделий из ферромагнитных материалов / Патент РФ № 2006136959/28, 18.10.2006. Патент России № 2330275. 2008. Бюл. № 21.
17. Горкунов Э.С., Лapidус Б.М., Загайнов А.В., Воронов С.А., Бушмелева Г.Я. Использование дифференциальной магнитной проницаемости для контроля качества поверхностного упрочнения // Дефектоскопия. 1988. № 7. С. 7—13.
18. Горкунов Э.С., Махов В.Н., Поволоцкая А.М., Тузанкин С.В., Субботин Ю.С., Лapidус Б.М. Магнитно-измерительный комплекс для магнитоструктурных исследований // Дефектоскопия. 1999. № 3. С. 78—84.
19. Byzov A.V., Ksenofontov D.G., Kostin V.N., Vasilenko O.N. Magnetic field distribution in steel objects with different properties of hardened layer // Advances in computational design. 2022. In print.
20. Tumanski S. Handbook of Magnetic Measurements. Warsaw University of Technology. Taylor & Francis Group, LLC, 2011. 383 p.
21. <https://cxem.net/software/finiteElementMethodMagnetics.php>
22. Костин В.Н., Осинцев А.А., Сташков А.Н., Ничипурук А.П., Костин В.Н., Сажина Е.В. Мобильные средства многопараметровой магнитной структуроскопии // Дефектоскопия. 2008. № 4. С. 66—77.
23. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Byzov A.V. DIUS-1.15M Mobile Hardware—Software Structuroscopy System // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 654—661.
24. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Mikhailov A.V., Lukinykh N.P., Ksenofontov D.G. On the Advantages of Local Measurement of Coercive Force of Ferromagnetic Objects Based on Internal Field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. P. 574—580.

МЕТОДИКА ПРАКТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДВУХМЕРНЫХ ДЕФЕКТОВ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА

© 2021 г. А.В. Никитин^{1,*}, А.В. Михайлов^{1,**}, А.С. Петров^{1,***}, С.Э. Попов^{1,****},
Ю.Л. Гобов^{1,*****}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
E-mail: *an@imp.uran.ru; **mikhaylov@imp.uran.ru; ***alex.s.petrov@rambler.ru;
****sergeyeduardovichpopov@gmail.com; *****go@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 30.09.2021; после доработки 29.10.2021
Принята к публикации 29.10.2021

Представлена устойчивая к ошибкам входных данных методика определения значений глубины и раскрытия поверхностного двухмерного дефекта в ферромагнетике. Дефекты и магнитные преобразователи находятся на разных сторонах металлической пластины. Учтены нелинейные свойства ферромагнетика. Компоненты магнитного поля в металле восстанавливались по измеренным компонентам магнитного поля над бездефектной поверхностью металла. В результате проведения численных экспериментов были получены границы применимости методики. Результаты методики проверены на эксперименте.

Ключевые слова: обратная геометрическая задача магнитостатики, дефектометрия, потеря сплошности металла, магнитное поле рассеяния дефекта, внутритрубные снаряды, дефектометрия бурильных труб магнитным методом.

DOI: 10.31857/S0130308221120058

ВВЕДЕНИЕ

Конфигурация, при которой поверхностные дефекты потери сплошности металла и магнитные преобразователи расположены на противоположных сторонах металлической пластины, характерна для многих отраслей промышленности и транспорта, в частности для магнитного контроля труб магистральных трубопроводов, а также для контроля бурильных труб непосредственно на буровых. В первом случае, система магнитных преобразователей перемещается внутри трубы, а дефекты в таких трубах располагаются на внешней поверхности стенки трубы. Во втором случае, система преобразователей перемещается по внешней поверхности бурильной трубы, а дефекты, вызванные воздействием бурового раствора, располагаются на внутренней поверхности стенки трубы.

Из-за нелинейного отклика ферромагнетика на внешнее магнитное поле восстановление геометрии поверхностного дефекта по компонентам магнитного поля, измеренным на определенном уровне над бездефектной металлической поверхностью, является сложной задачей.

Так, с одной стороны, до сих пор не удается восстановить геометрию поверхностного дефекта потери сплошности металла произвольной формы в трехмерном случае, используя информацию, полученную путем решения прямой задачи: путем получения полей от множества различных дефектов (математическое моделирование, эксперимент) и их сравнения с исследуемым полем [1—4].

А с другой стороны, работы по решению обратной задачи магнитостатики ограничиваются линейным (т.е. предполагается, что магнитная индукция ферромагнетика линейно зависит от напряженности магнитного поля) и двухмерным случаем [5—8].

В работе [7] представлено решение обратной геометрической задачи магнитостатики без использования априорной информации. Однако задача была решена только для двухмерного случая и с учетом линейной зависимости индукции магнитного поля от напряженности магнитного поля, кроме того, магнитные преобразователи были расположены непосредственно над дефектной поверхностью металла.

В работах [9, 10] была приближенно решена задача восстановления геометрии поверхностного дефекта произвольной формы в магнитомягких ферромагнетиках в двухмерном линейном и трехмерном случае с учетом нелинейных свойств ферромагнетика. В обоих случаях поле было измерено (результат решения прямой задачи в пакетах FEMM, ELMER соответственно) над несодержащей дефект поверхностью металла. Используемое в [9, 10] приближение можно описать следующим образом. В магнитомягких материалах выход магнитного потока из ферромагнетика даже в зоне дефекта (плавного дефекта произвольной формы) составляет всего несколько процентов. Следовательно, восстанавливая стационарное магнитное поле с «верхней» бездефектной поверхности пластины ферромагнетика на «нижнюю» поверхность, которая содержит дефект, и даже ниже, предполагаем, что

всюду внизу находится металл. В результате, можно построить две силовые линии, одна проходит по «верхней» бездефектной поверхности металла, другая начинается в бездефектной зоне «слева» на «нижней» поверхности, проходит через дефект и заканчивается в бездефектной зоне «справа» на «нижней» поверхности металла. Поток магнитной индукции через поверхность между двумя силовыми линиями постояен. Если пренебречь потерей нескольких процентов потока в зоне дефекта, то мы получим силовую линию, приближенно описывающую форму дефекта на нижней поверхности, поскольку она соответствует начальным условиям задачи — значениям компонент магнитного поля, измеренным в результате численного и реального экспериментов. Стоит отметить, что трубы для магистральных газопроводов и бурильные трубы изготавливаются из магнитомягких ферромагнетиков.

Поверхностный двухмерный дефект в настоящей работе — это дефект, у которого ширина уменьшается с глубиной, а форма дефекта описывается функцией, имеющей ограниченную производную по x в каждой точке (правый дефект на рис. 1). Либо это дефект-пропил, имеющий форму прямоугольника (рис. 8), но при этом глубина не превышает раскрытие.

Область применения данного метода исследована численными экспериментами в заключительной части статьи. Данным методом невозможно восстановить геометрическую форму трещин и трещиноподобных дефектов, у которых глубина как минимум в 10 раз превышает раскрытие. Определенные дефекты потери сплошности, а также трещин и трещиноподобных дефектов дано в [12].

Настоящая статья по последовательности изложения состоит из четырех частей.

В первой части показан алгоритм повышения устойчивости построения силовой линии в двухмерном нелинейном случае при добавлении однородного шума во входные данные (добавлении ошибки во входные данные), что позволяет использовать настоящую методику при обработке экспериментальных данных. В первой части двухмерные электромагнитные поля, необходимые для получения данных измерений, рассчитываются в пакете программ FEMM, где в исследуемой области, содержащей ферромагнетик и «воздух», решается прямая задача. Магнитное поле задается разностью магнитных потенциалов на верхней и нижней границе исследуемой области. На правой и левой границах этой области тангенциальные составляющие компонент напряженности магнитного поля равны нулю. Форма исследованного дефекта показан на рис. 7.

Во второй части, в пакете программ ELMER, позволяющем решать прямую задачу — рассчитать трехмерные электромагнитные поля в исследуемом пространстве, содержащем «воздух», ферромагнетик и провода с током, моделируется эксперимент. Следует сказать, что выбор модели двухмерного дефекта определяется тем, что реальный трехмерный дефект сильно вытянут в поперечном направлении к направлению внешнего приложенного поля. В некоторой, достаточно удаленной от краев дефекта области в плоскости XY (рис. 4—6) получаются условия двухмерности ($H_y = \text{const}$), где можно применить алгоритм вычисления координат магнитной силовой линии, описанный в части 1.

В третьей части описывается экспериментальная установка и приводятся результаты эксперимента.

В четвертой части путем численных экспериментов в пакете программ FEMM исследована область применимости методики.

Часть 1

ГЕОМЕТРИЯ ЗАДАЧИ

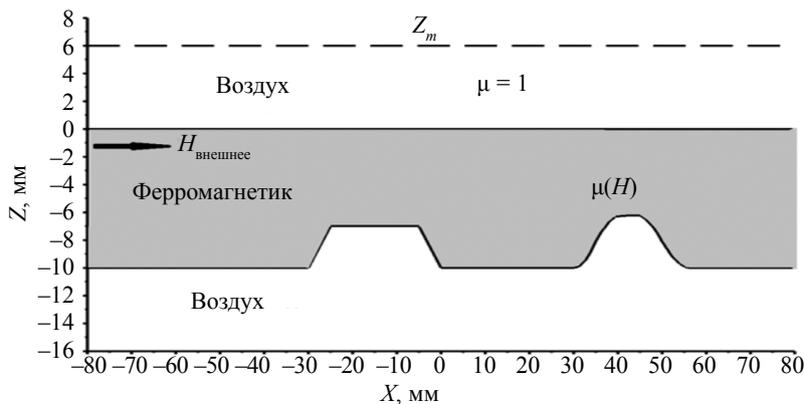


Рис. 1. Измерения проводятся на уровне Z_m над бездефектной поверхностью металлической пластины. Показано направление приложенного внешнего стационарного магнитного поля, μ — относительная магнитная проницаемость магнитомягкого ферромагнетика.

ПЕРЕСЧЕТ ЗНАЧЕНИЙ КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С УРОВНЯ ИЗМЕРЕНИЯ НА УРОВЕНЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА МЕТАЛЛ—ВОЗДУХ СО СТОРОНЫ МЕТАЛЛА

По измеренным значениям компонент магнитного поля в воздухе можно восстановить магнитное поле до границы с металлом, например, следующим образом. Перепишем уравнения Максвелла для случая магнитостатики в виде начальной задачи Коши и решим ее в конечных разностях (то же самое будем делать и в металле). Начальными условиями будут полученные значения компонент магнитного поля и их производных по оси абсцисс на уровне измерения Z_m . Эта процедура описана в [9, 10] и далее (для вычисления поля в металле) процедура будет подробно описана еще раз, поэтому мы опускаем здесь ее описание. В результате получаем значения компонент магнитного поля на уровне $z = +0$ (граница воздух—металл со стороны воздуха).

Далее, используя выражения для сопряжения на границе раздела двух сред (непрерывность тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля и нормальной составляющей магнитной индукции), мы пересчитываем значения составляющих магнитного поля с уровня $z = +0$ на уровень $z = -0$ уровень (граница раздела воздух—металл со стороны металла). Эти значения будут начальными условиями задачи Коши в металле. Зная значения составляющих напряженности магнитного поля и магнитной индукции, можно вычислить значения их производных по оси абсцисс на уровне $z = -0$.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МЕТАЛЛЕ

Запишем уравнения Максвелла для случая магнитостатики вместе с материальным уравнением:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0; \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= 0; \\ \mathbf{B} &= \mu(|\mathbf{H}|) \times \mathbf{H}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{B} и \mathbf{H} — векторы магнитной индукции и напряженности магнитного поля соответственно, а

$$|\mathbf{H}| = \sqrt{(H_x)^2 + (H_z)^2}.$$

В качестве зависимости $\mu(H)$ возьмем известную зависимость $\mu(H)$ для стали 20. Перепишем систему уравнений (1) в векторных компонентах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_z}{\partial z} &= -\frac{\partial B_x}{\partial x}; \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} &= \frac{\partial H_z}{\partial x}; \\ B_z &= \mu\left(\sqrt{(H_x)^2 + (H_z)^2}\right) \cdot H_z, \\ B_x &= \mu\left(\sqrt{(H_x)^2 + (H_z)^2}\right) \cdot H_x. \end{aligned} \quad (2)$$

Система (2) состоит из 4-х уравнений и содержит 4 неизвестных: H_x , H_z , B_x , B_z . Перепишем систему уравнений (2) в конечных разностях в форме начальной задачи Коши. Учтем отрицательный знак перед Δ_z — ось OZ направлена «вверх», а пересчитываем мы поле «вниз» (см. рис.1):

$$B_z(x, Z_0 - \Delta_z) = B_z(x, Z_0) + \frac{\Delta_z \cdot dB_x}{dx}; \quad (3)$$

$$H_x(x, Z_0 - \Delta_z) = H_x(x, Z_0) - \frac{\Delta_z \cdot dH_z}{dx}; \quad (4)$$

$$B_z(x, Z_0 - \Delta z) = \mu\left(\sqrt{H_x(x, Z_0 - \Delta z)^2 + H_z(x, Z_0 - \Delta z)^2}\right) \cdot H_z(x, Z_0 - \Delta z), \quad (5)$$

$$B_x(x, Z_0 - \Delta z) = \mu \left(\sqrt{H_x(x, Z_0 - \Delta z)^2 + H_z(x, Z_0 - \Delta z)^2} \right) \cdot H_x(x, Z_0 - \Delta z), \quad (6)$$

Z_0 — указывает уровень границы раздела металл—воздух со стороны металла.

Рассмотрим систему уравнений (3)—(6). Уравнения (3) и (4) позволяют пересчитать значения H_x и B_z на уровне $Z_0 - \Delta z$. Из уравнения (5) можем определить значение функции $H_z(x, Z_0 - \Delta z)$, после получения которого можно вычислить $B_x(x, Z_0 - \Delta z)$, используя (6). Повторяя эту процедуру, можно шаг за шагом восстанавливать составляющие магнитного поля на «нижнюю» поверхность пластины, которая содержит дефект. Каждый раз мы предполагаем, что всюду ниже у нас металл.

СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЛИНИИ

Восстановив компоненты магнитного поля в металлической пластине, для построения силовой линии магнитного поля в [9, 10] решалось следующее дифференциальное уравнение $\frac{dx}{H_x} = \frac{dz}{H_z}$. Полученная таким образом магнитная линия хорошо описывает форму плавного поверхностного дефекта [9, 10], но неустойчива к шумам во входных данных, и уже 1-2 % однородного шума в начальных значениях компонент магнитного поля делают невозможным построение магнитной линии на нижней поверхности пластины.

Силовую линию магнитного поля можно построить и другим способом. Используем метод наименьших квадратов (МНК). Разобьем область металла линиями, параллельными осям OX и OZ . Пересечения линий будут узлами такой сетки. Запишем для узлов сетки:

$$\left(\frac{H_z}{H_x} - \frac{dZ}{dx} \right)^2 \rightarrow \min,$$

где Z — это z -координаты точек силовой магнитной линии в металле.

В конечных разностях можно заменить производную $\frac{dZ}{dx}$ произведением двух матриц: $A_{k,l} \times Z_l$, где матрица \hat{A} — ленточная матрица. Матрица \hat{A} имеет следующий вид:

$$\begin{array}{cccccccccccc} \frac{-1}{\Delta} & \frac{1}{\Delta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \text{первая строка;} \\ 0 & \frac{-1}{\Delta} & \frac{1}{\Delta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \text{вторая строка;} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\Delta} & \frac{1}{\Delta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \text{третья строка, } \Delta \text{— шаг по оси } x. \end{array}$$

.....

Запишем для узлов сетки (i, j) : $R_{i,j} = H_{z_{i,j}} / H_{x_{i,j}}$. Тогда задачу МНК в матричной форме можно переписать как

$$\left(\hat{R} - \hat{A} \times \hat{Z} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

стандартным решением для (4) будет

$$\hat{Z} = \hat{R} \times \hat{A} \times \left(A^T \times \hat{A} \right)^{-1},$$

где A^T — транспонированная матрица.

Такой способ построения магнитной линии значительно экономит компьютерное время и более устойчив к шумам во входных данных задачи. В дальнейшем, для восстановления геометрии поверхностного дефекта мы будем использовать магнитную линию, полученную этим методом.

РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДНЫХ КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ОСИ АБСЦИСС

В процессе численного пересчета компонент магнитного поля с одного уровня на другой в сторону источника, вследствие ошибок во входных данных, производные компонент магнитного поля могут перестать быть непрерывными функциями от ординаты. Чтобы справиться с этим, предложен следующий метод. В уравнениях (3) и (4) можно образы Фурье производных dB_x/dx и dH_z/dx умножить на коэффициент регуляризации, равный, например, $1/(1 + \alpha \cdot \omega^2)$, где параметр α выбирается численным экспериментом, а ω — переменная образа Фурье [11].

На рис. 2 показана построенная таким образом магнитная линия, описывающая дефект в виде гауссианы глубиной 4 мм и раскрытием 24 мм. Силовая линия магнитного поля получена с учетом нелинейности ферромагнетика (сталь 20) с 10 % однородным шумом во входных значениях магнитного поля. Внешнее магнитное поле было направлено по оси абсцисс, его величина составляла 8089 А/м. Уровень измерений находился в воздухе на высоте 2 мм над бездефектной поверхностью ферромагнетика. При решении обратной задачи использовались исходные данные (значения компонент магнитного поля на уровне «измерений»), полученные в результате решения прямой задачи в пакете FEMM.

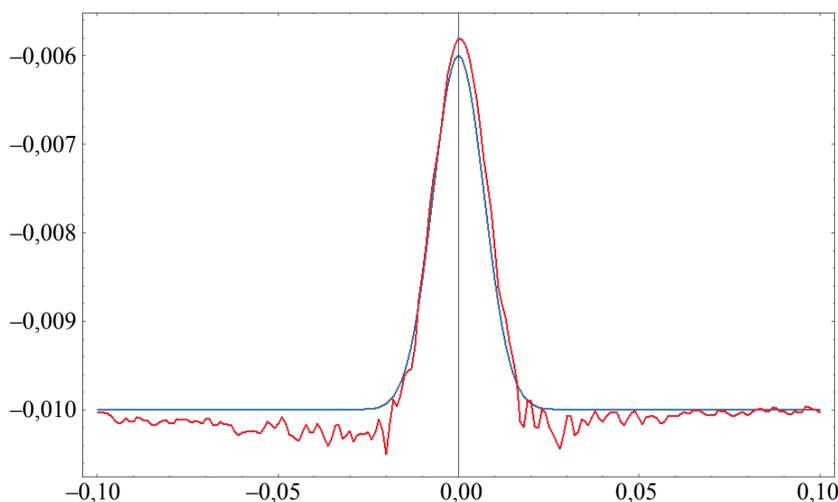


Рис. 2. Плоскость $Y = 0$. Линия магнитного поля хорошо описывает дефект глубиной 4 мм, раскрытием 24 мм, $\alpha = 2,5$. Добавлен 10 % однородный шумом во входных данных. По осям (вертикальная ось OZ , горизонтальная ось OX) отложена длина в метрах. Метка минус 0,01 м соответствует нижней поверхности металла в бездефектной области. На рисунке более плавная кривая соответствует форме дефекта.

Часть 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В ПАКЕТЕ ELMER

На практике двумерный дефект потери сплошности металла на металлической пластине можно смоделировать на «центральной», равноудаленной от краев дефекта линии трехмерного дефекта. Для конфигурации, рассматриваемой в настоящей работе, дефект вытянут в направлении оси OY (см. рис.1). Условием двумерности дефекта удовлетворяет область, где значения H_y слабо меняются и, к тому же, пренебрежимо малы по сравнению с другими компонентами магнитостатического поля, поэтому можно считать, что всюду в этой области H_y постоянна, данная область показана на рис. 3. В этой области компоненты H_x и H_z имеют значения порядка 10^4 А/м, H_y принимает значения порядка 10^2 А/м, на «центральной» линии H_y не превышает нескольких А/м.

Контуры дефекта можно определить по топографии компонент напряженности магнитного поля, как показано на рис. 4—6.

Форма дефекта на «центральной» линии в плоскости XZ восстанавливается по алгоритму описанному ранее.

На рис. 7, 8 показаны дефекты, для которых была решена прямая задача в пакете ELMER по получению компонент магнитостатического поля на уровне 2 мм над бездефектной поверхностью металлической пластины, по которым впоследствии и рассчитывалась геометрия дефектов.

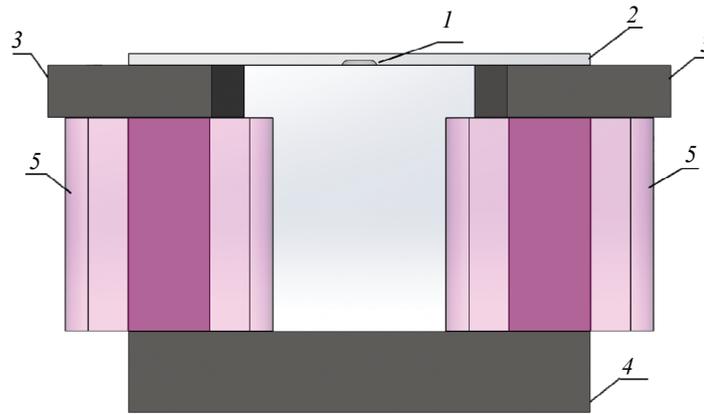


Рис. 3. Экспериментальная установка, смоделированная в пакете ELMER: 1 — поверхностный дефект; 2 — исследуемая стальная пластина (сталь 20, размеры 200 мм — 400 мм, толщина 10 мм); 3 — полюса электромагнита; 4 — магнитопровод. Материал полюсов магнита и магнитопровода — железо АРМКО; 5 — медная намотка катушек электромагнита. Магнитодвижущая сила катушек электромагнита — 1200 Ампер-витков. Размеры установки соответствуют размерам реальной экспериментальной установки.

В пакете ELMER была смоделирована реальная экспериментальная установка (см. рис. 3).

Результаты численного эксперимента показали, что для исключения искажений в графиках H_x , H_y и H_z , связанных со способом намагничивания пластины, необходимо из компонент напряженности магнитного поля H_y и H_z , полученных в результате решения прямой задачи с учетом дефекта в пластине, вычесть соответствующие компоненты, полученные в результате решения прямой задачи от пластины, не содержащей дефекта. Из H_x также была вычтена соответствующая компонента, однако к результату было добавлено среднее значение H_x в бездефектной пластине на отрезке, где поле менялось незначительно (результатирующие компоненты поля показаны на рис. 11). Вышеупомянутый отрезок имеет общую длину 129 мм, включая отрезок под дефектом и отрезки по 50 мм от краев от границы дефекта вдоль «центральной» линии (рис. 4).

В результате проведения численного эксперимента были подобраны величины шагов дискретизации по осям OX и OZ (обозначим их Δ и Δ_z соответственно), позволяющим решать задачу для плавных дефектов произвольной формы. Величины шагов дискретизации составили: для Δ — 1 мм, для Δ_z — 2 мм.

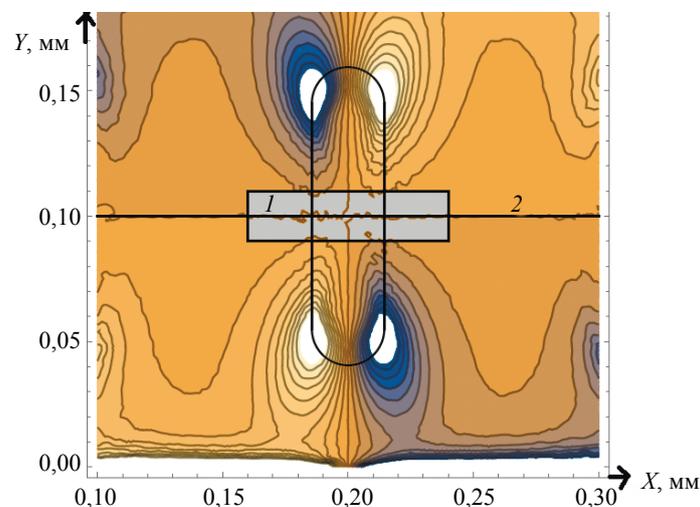


Рис. 4. Топография магнитного поля в плоскости $z = Z_m$ получена в результате решения прямой задачи в пакете ELMER. Показана взаимная конфигурация изолиний H_y и дефекта. Четыре полюса H_y показывают края дефекта. Цифрой 1 обозначена область, в которой реальный трехмерный дефект обладает свойствами двумерности. Цифра 2 обозначает сечение плоскости XY плоскостью XZ , на которой восстанавливаем геометрию дефекта.

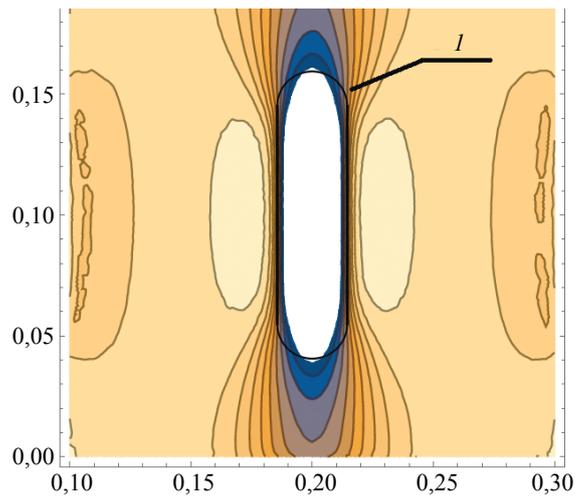


Рис. 5. Топография магнитного поля в плоскости $z = Z_m$ получена в результате решения прямой задачи в пакете ELMER. Показана взаимная конфигурация изолиний H_x и дефекта. Цифрой 1 обозначен край дефекта.

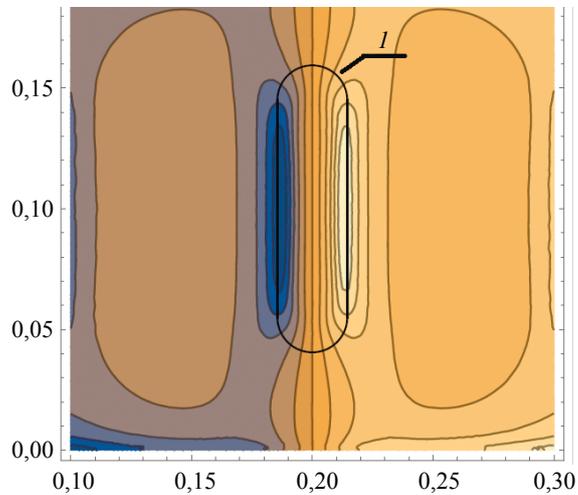


Рис. 6. Топография магнитного поля в плоскости $z = Z_m$ получена в результате решения прямой задачи в пакете ELMER. Показана взаимная конфигурация изолиний H_z и дефекта. Цифрой 1 обозначен край дефекта.

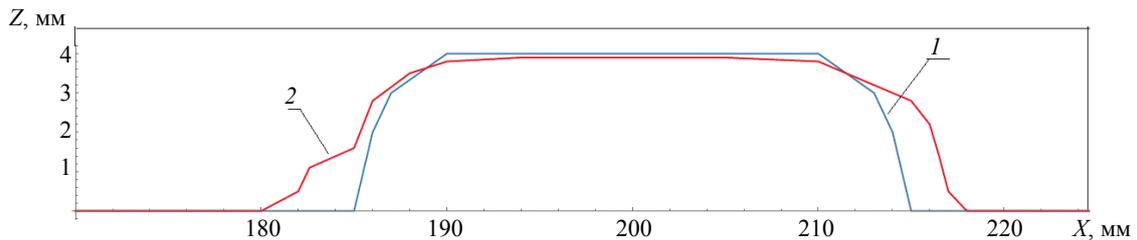


Рис. 7. Силовая магнитная линия описывает локальную геометрию дефекта вдоль «центральной» линии. Глубина дефекта 4 мм, раскрытие дефекта 29 мм. Компоненты магнитного поля были получены над бездефектной поверхностью металла (сталь 20), на высоте 2 мм, в результате решения прямой задачи в пакете ELMER. Кривая 1 показывает форму дефекта; кривая 2 представляет силовую магнитную линию.

В результате, были получены магнитные силовые линии, хорошо описывающие глубину дефекта (см. рис. 7, 8). Величину раскрытия дефекта можно легко определить по топографии магнитного поля (см. рис. 4—6).

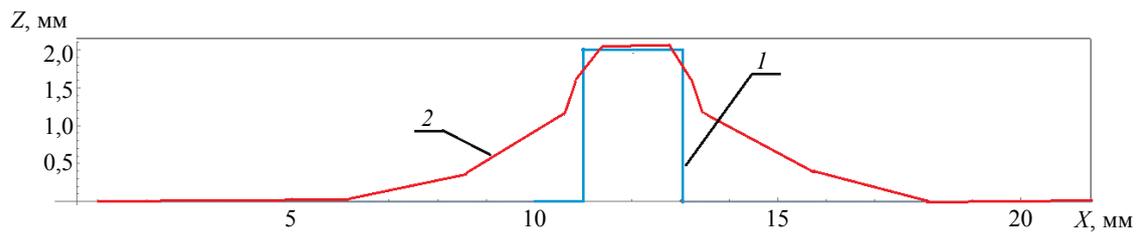


Рис. 8. Силовая магнитная линия описывает локальную геометрию дефекта вдоль «центральной» линии. Глубина дефекта 2 мм, раскрытие дефекта 2 мм. Компоненты магнитного поля были получены над бездефектной поверхностью металла (сталь 20) на высоте 2 мм, в результате решения прямой задачи в пакете ELMER. Кривая 1 показывает форму дефекта; кривая 2 представляет силовую магнитную линию.

Часть 3

ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ НА ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Для экспериментальной проверки приведенной выше методики была собрана экспериментальная установка, показанная на рис. 8. Измерения компонент магнитного поля проводились с помощью интегральной микросхемы, содержащей твердотельный трехосный датчик Холла ALS31300EEJASR-1000 [13]. Микросхема была установлена в корзинку и двигалась над бездефектной поверхностью пластины на расстоянии 2 мм.

В целях уменьшения шума во входных данных, каждое значение измерения представляет собой среднеарифметическую величину от 1000 измерений в данной точке.

Искусственный дефект показан на рис. 9. Металлические пластины с дефектом и без дефекта сделаны из стали 20.

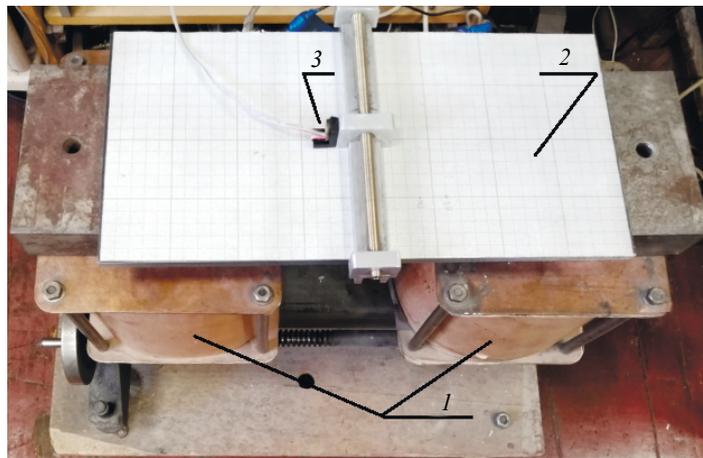


Рис. 9. Экспериментальная установка:
1 — система намагничивания стальной пластины; 2 — пластина из стали 20, размером 400 мм на 200 мм; 3 — «корзинка» для перемещения интегральной микросхемы с датчиком ALS31300EEJASR-1000.

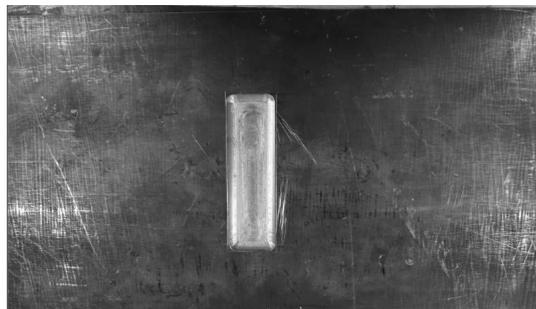


Рис. 10. Внешний вид искусственного дефекта. Глубина дефекта 4 мм, раскрытие — 29 мм.

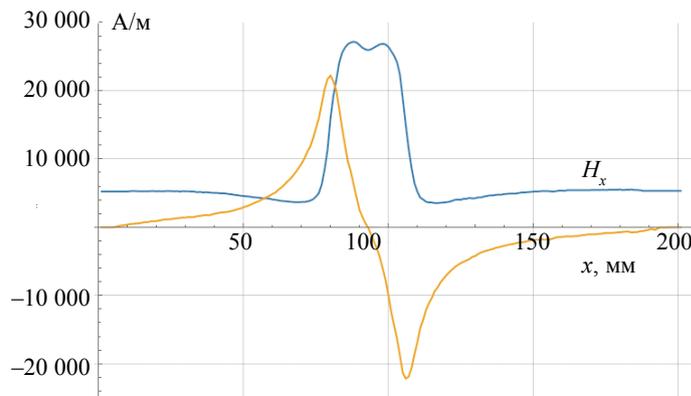


Рис. 11. После обработки экспериментальных данных устранены искажения, вносимые источником магнитного поля, и теперь значения компонент напряженности магнитного поля не отличаются от соответствующих значений, получаемых в результате решения прямой задачи в пакетах FEMM и ELMER.

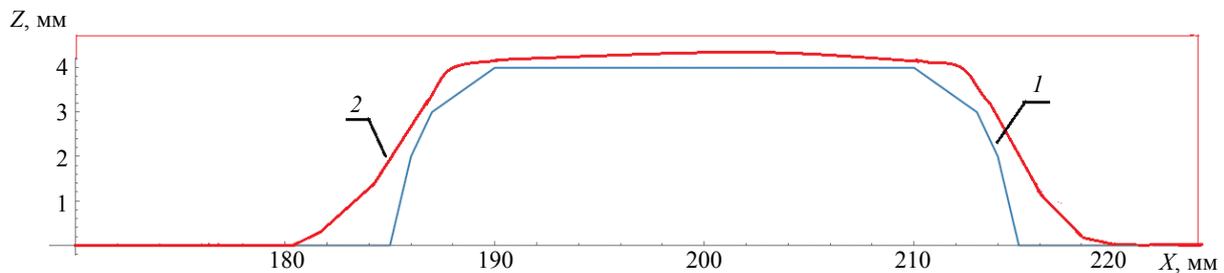


Рис. 12. Силовая магнитная линия описывает локальную геометрию дефекта вдоль «центральной» линии. Глубина дефекта 4 мм, раскрытие дефекта 29 мм. Компоненты магнитного поля были получены экспериментально, над бездефектной поверхностью металла (сталь 20), на высоте 2 мм. Кривая 1 показывает форму дефекта; кривая 2 представляет силовую магнитную линию.

Датчик двигался вдоль «центральной» линии (см. рис. 3). После процедур вычитания, описанных в предыдущей части, получили графики для H_x и H_z , соответствующие аналогичным, при расчете начальных значений в пакете FEMM, где поле задается значениями потенциалов на границах расчетной области «сверху» и «снизу» и отсутствием тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на боковых ребрах этой области (см. рис. 10).

В результате экспериментально была получена магнитная линия, хорошо описывающая локальную геометрию реального дефекта вдоль «центральной» линии (рис. 12).

Часть 4

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДИКИ

В результате проведения эксперимента и последующей обработки его результатов получено подтверждение успешности работы методики, а также подтверждение того, что рассчитанные в пакетах FEMM и ELMER начальные условия не отличаются (после проведения соответствующих процедур обработки) от начальных условий, полученных экспериментально. Таким образом, появилась возможность путем проведения численных экспериментов определить границы размеров дефектов, определяемых методикой.

Исследовались толщины пластин 9, 10 и 12 мм. Выбор этих величин продиктован тем, что стенки большинства размеров бурильных труб имеют такие толщины. Максимальная глубина дефекта не превышала половины толщины стенки пластины, что опять же выбрано из практических соображений.

Очевидно что дефект с большими размерами (раскрытие), чем дефект, исследованный в ходе эксперимента, будет проще описать магнитной линией. Поэтому были исследованы границы

применения методики в сторону уменьшения величины глубины дефекта и величины его раскрытия. Из-за подобия рисунков, на которых магнитные линии описывают дефекты, мы не будем их приводить здесь. В результате численных экспериментов был получен результат — методика с большой точностью описывает поверхностные дефекты глубиной до 2 мм (см. рис. 8), раскрытие дефекта до величины 2 мм можно определить по топографии компонент восстановленного магнитного поля в металле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые представлена практическая методика восстановления геометрии двухмерного дефекта в пластине из магнитомягкого ферромагнетика по данным магнитных преобразователей, расположенных на противоположной (бездефектной) стороне пластины. При этом были учтены нелинейные свойства ферромагнетика. Методика подтверждена экспериментально.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Поле рассеяния пластины с поверхностным дефектом в однородном внешнем поле // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 23—31.
2. Дякин В.В. Математические основы классической магнитостатики. РИО УрО РАН, 2016, 404 с.
3. Chadebec O., Coulomb J.-L., Janet F. A review of magnetostatic moment method // IEEE Transactiona on magnetics. 2006. V. 42. No. 4. P. 515—520.
4. Шур М.Л., Новослугина А.П., Смородинский Я.Г. Магнитное поле дефекта произвольной формы в плоскопараллельной пластине // Дефектоскопия. 2015. № 11. С. 14—27.
5. Шур М.Л., Новослугина А.П., Смородинский Я.Г. Об обратной задаче магнитостатики // Дефектоскопия. 2013. № 8. С. 43—53.
6. Кротов Л.Н. Реконструкция границы раздела сред по пространственному распределению магнитного поля рассеяния. I. Исследование свойств решения вспомогательной прямой задачи // Дефектоскопия. 2004. № 2. С. 76—82.
7. Кротов Л.Н. Реконструкция границы раздела сред по пространственному распределению магнитного поля рассеяния. II. Постановка и метод решения обратной геометрической задачи магнитостатики // Дефектоскопия. 2004. № 6. С. 36—44.
8. Vuillermet Y., Chadebec O., Coulomb J.-L., Rouve L.-L., Cauffet G., Bonjiraud J.L., Demilier L. Scalar potential formulation and inverse problem applied to thin magnetic sheets // IEEE Transactiona on magnetics. 2008. V. 44. No. 6. P. 1054—1057.
9. Gobov Yu.L., Nikitin A.V., Popov S.E. Solving the Inverse Geometric Problem of Magnetostatics for Corrosion Defects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 726—732.
10. Gobov Yu.L., Nikitin A.V., Popov S.E. Solving the Inverse Geometric Problem of Magnetostatics for Corrosion Defects with Allowance for Nonlinear Properties of Ferromagnet // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 849—854.
11. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: Методы, алгоритмы, программы. Справочное пособие. Киев: Наукова думка. 1986.
12. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines, 2016. <https://pipelineoperators.org/>
13. ALS31300, 2021. <https://www.allegromicro.com/>

ВЫЯВЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ В АУСТЕНИТНОЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ПРОКАТКИ

© 2021 г. М.Б. Ригмант^{1,*}, Н.В. Казанцева¹, А.В. Кочнев¹, Ю.Н. Козмец¹, Ю.В. Корх¹, М.К. Корх¹, М.С. Карабаналов²

¹Институт физики металлов УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

²Уральский Федеральный университет им. Первого президента Б.Н. Ельцина, Россия 620002

Екатеринбург, ул. Мира, 19

*E-mail: rigmant@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 19.08.2021; после доработки 15.11.2021

Принята к публикации 17.11.2021

Проведены исследования текстуры, фазового состава и магнитной анизотропии в деформированных прокаткой аустенитных образцах стали 09X17H5Ю при образовании в них мартенсита деформации. Показано, что метод магнитного неразрушающего контроля, использующий измерение магнитных полей от локально намагниченных участков, чувствителен к анизотропии магнитной проницаемости. Анизотропия магнитных свойств связана с появлением механической текстуры прокатки. Во всех исследованных деформированных образцах обнаружено формирование ограниченной ГЦК-текстуры прокатки $\{110\}\langle 111 \rangle$. Формирование текстуры прокатки, характерной для ОЦК-структуры (мартенсита деформации в малоуглеродистых аустенитных сталях), начинается с 30 % деформации аустенитного образца. Образование ферромагнитного мартенсита деформации в аустенитной стали 09X17H5Ю подтверждено методом магнитно-силовой микроскопии.

Ключевые слова: магнитные методы контроля, фазовый состав, аустенитная сталь, мартенсит деформации, механическая текстура.

DOI: 10.31857/S013030822112006X

ВВЕДЕНИЕ

Аустенитные стали обладают такими свойствами, как коррозионная стойкость, жаропрочность, пластичность, поэтому находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Значительное влияние на технические свойства данных сталей оказывает фазовый состав металла. При эксплуатации изделий из аустенитных сталей под действием деформаций и температуры в структуре аустенитного материала возможно протекание мартенситного превращения. Появление мартенсита деформации в аустенитной стали может привести к охрупчиванию металла и резкому снижению коррозионных свойств, что обуславливает необходимость выявления мартенсита деформации на ранних стадиях его зарождения для предотвращения разрушения конструкции.

Мартенсит деформации (α' -фаза) является ферромагнитной фазой, вследствие чего его присутствие можно определять с помощью магнитных методов [1]. Наиболее распространенные методы магнитного контроля, использующие намагниченность насыщения, дают ответ об общем содержании ферромагнитных фаз, однако не позволяют проводить исследования анизотропии магнитных свойств ввиду одноосного намагничивания материала до состояния магнитного насыщения. Прибор магнитного неразрушающего контроля маломагнитных материалов «ФерроКОМ-ПАС», являющийся разработкой ИФМ УрО РАН им. М.Н. Михеева, основан на локальном измерении магнитных полей от намагниченного участка контролируемого материала, откалиброванным в значениях магнитной проницаемости [2]. В связи с особенностями конструкции измерительный преобразователь прибора чувствителен к возможному проявлению анизотропии магнитных свойств. При этом намагничивание контролируемой поверхности осуществляется приставным локальным цилиндрическим магнитом, а измерение проводится только по одному из направлений [3].

В работе [4] при изучении конструкционных сталей (Ст3, 09Г2С, 08Г2Б), подвергнутых прокатке и одноосному растяжению, была обнаружена связь между механической и магнитной анизотропией: изменение тангенциальной и нормальной составляющих полей рассеяния, а также коэрцитивной силы происходило в двух взаимно перпендикулярных направлениях по отношению к оси деформации. В статье [5] было показано, что деформация холодной прокаткой оказывала влияние на магнитные характеристики аустенитной стали 08X18H10T. Однако подробные структурные и текстурные исследования деформированных образцов из аустенитной стали в работе [5] не проводили.

Возникновение анизотропии магнитных свойств в аустенитных материалах, обусловленной процессом деформации (текстурой), может свидетельствовать о наличии фазовых переходов с формированием ферромагнитных фаз (мартенсита деформации).

Целью настоящей работы является выявление анизотропии магнитных свойств и ее связи с образованием мартенсита деформации в аустенитной хромоникелевой стали 09X17H5Ю с помощью методов магнитного неразрушающего контроля и структурного анализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве материалов для исследований было взято три образца прямоугольного сечения из аустенитной стали 09X17H5Ю, не содержащей феррит, которые подвергли прокатке при комнатной температуре. Размеры образцов представлены в табл. 1. Деформация была рассчитана по изменению толщины образца после прокатки.

Таблица 1

Поперечное сечение исследуемых образцов

Номер образца	Деформация, %	Поперечное сечение, мм×мм
Исходный	0	10,75×4,35
1	16	10,90×3,65
2	31	11,35×3,00
3	55	12,0×1,95

Определение процентного содержания образовавшейся ферромагнитной фазы (мартенсита деформации) в образцах проводили по намагниченности насыщения, измеренной с помощью установки сильных магнитных полей [6]:

$$\%M = \frac{J_s^{\text{i a}\delta}}{J_s^{100}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $\%M$ — процентное содержание мартенсита деформации, %; $J_s^{\text{обр}}$ — экспериментально определенная намагниченность насыщения образца, кА/м; J_s^{100} — намагниченность насыщения исследуемой стали, содержащей максимально возможное (100 %) количество ферромагнитной фазы при данном химическом составе, кА/м.

Намагниченность насыщения образца была рассчитана по формуле:

$$J_s^{\text{i a}\delta} = \frac{\Delta\Phi}{\mu_0 \cdot \omega \cdot S}, \quad (2)$$

где $\Delta\Phi$ — измеренное значение магнитного потока, Вб; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; ω — разность числа витков дифференциальной катушки, $\omega = 112$; S — площадь поперечного сечения образца, м².

Значение J_s^{100} можно рассчитать, зная химический состав исследуемой стали [2].

Относительная магнитная проницаемость μ была измерена прибором «ФерроКОМПАС» вдоль и поперек направления прокатки. Погрешность измерения прибора согласно сертификату калибровки составляет $\pm 0,003$ (Сертификат калибровки № 002220-285-261 от 24 декабря 2018, ФГУП «УНИИМ»). Схема работы измерительного преобразователя приведена на рис. 1 [2].

Измерение коэрцитивной силы проводилось с целью качественной оценки типа ферромагнитной фазы (феррита или мартенсита) на экспериментальной установке для исследования магнитоупругого эффекта магнитометрического типа, описанной в работе [7]. Основными элементами установки являются два соленоида, включенных встречно, за счет чего происходит компенсация магнитных полей в центральной зоне между ними, где расположен локальный феррозондовый полемер. При помещении образца в один из соленоидов измеряют магнитное поле рассеяния от

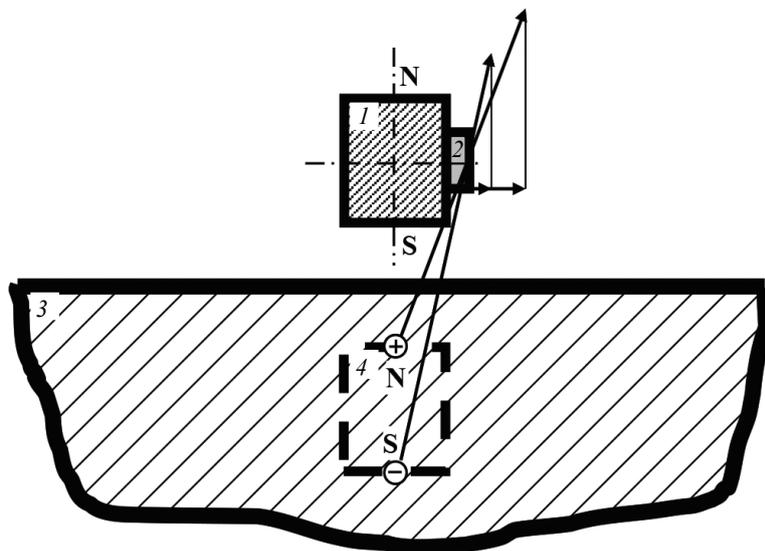


Рис. 1. Принципиальная схема работы измерительного преобразователя с датчиком Холла:

1 — постоянный магнит; 2 — датчик Холла; 3 — контролируемый объект; 4 — зеркальное отражение намагниченного контролируемого участка.

образца. Показания полемера, при котором намагниченность равна нулю, соответствуют величине коэрцитивной силы.

Анализ структуры осуществляли на растровом микроскопе ZEISS CrossBeam AURIGA. Для определения ориентировки отдельных зерен и анализа локальной текстуры использовали приставку EBSD HKL Inca с системой анализа Oxford Instruments Chennal 5. Шаг сканирования 0,1 мкм. Погрешность определения ориентации кристаллической решетки — не более $\pm 1^\circ$ (в среднем $\pm 0,6^\circ$). При анализе ориентировок зерен была принята такая система координат, где ось Ox соответствовала направлению прокатки (НП), Oy — нормали к плоскости прокатки (НН) и Oz — направлению, перпендикулярному направлению прокатки (ПН). Для проведения исследования микроструктуры и текстуры на образцах были подготовлены металлографические шлифы на плоскости $Ox-Oz$.

Изображения атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии были получены на сканирующем зондовом микроскопе Solver Next, используемом для исследования локальных поверхностных свойств твердых тел с высоким пространственным разрешением (до 0,2—0,3 нм).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты сканирующей электронной микроскопии

На рис. 2 представлены изображения и ориентационные карты исследуемых образцов, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. На выделенном участке на рис. 2а можно видеть, что внутри зерен аустенита после прокатки возникает пластинчатая структура, которая может быть связана с ОЦК-мартенситом деформации. Длина зерна составила около 40 мкм. С увеличением степени деформации (рис. 2а, в, д) происходит сужение зерен и их вытягивание по направлению прокатки (ширина зерен меняется от 30 мкм в образце № 1 до 20 мкм в образце № 2). Количество зерен с внутренней пластинчатой структурой увеличивается. При этом можно видеть, что пластины образуются в зернах, ориентированных вдоль направления прокатки.

В образце № 3 ширина зерна составляет порядка 10 мкм, причем внутренняя структура зерна фактически неразличима (рис. 2д). Для исследования текстуры в деформированных прокаткой образцах были построены прямые полюсные фигуры с нанесенной на них сеткой Вульфа (рис. 3). Шаг сетки составляет 10° . На полюсных фигурах с осью проекции $\{111\}$ можно видеть, что из 6 направлений $\langle 110 \rangle$, обозначенных красным цветом на рисунке, которые должны быть равнозначными в обычном ГЦК-кристалле, с увеличением степени деформации остаются только 4 направления, что подтверждает формирование предпочтительной ориентации в металле.

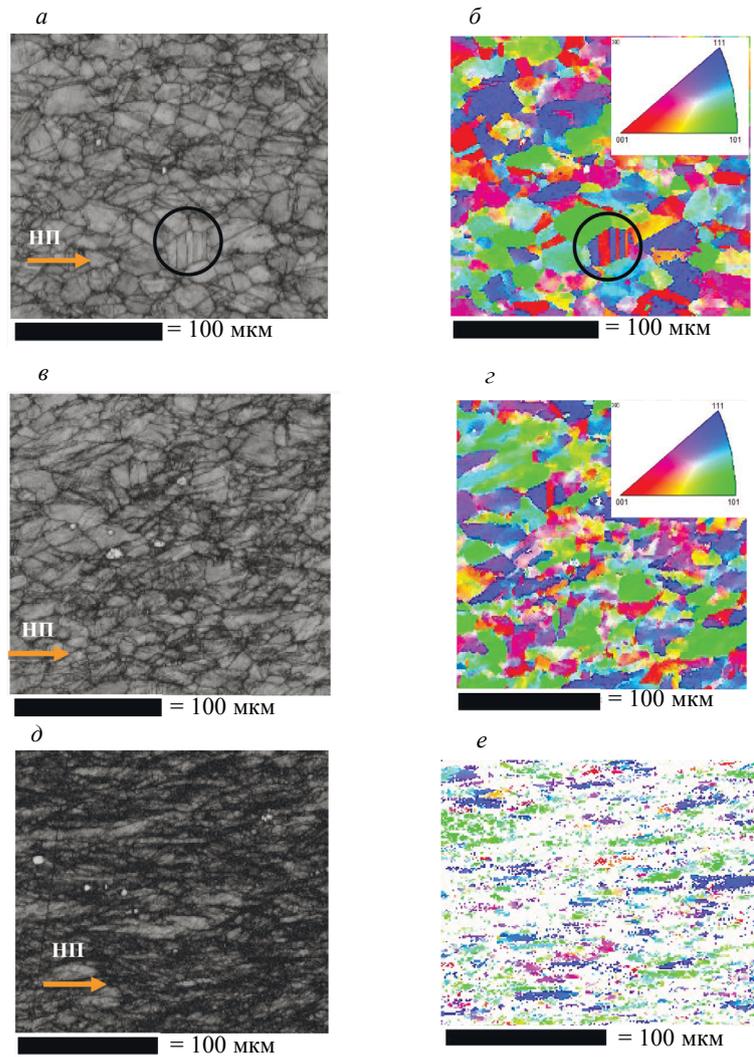


Рис. 2. Изображения сканирующей электронной микроскопии и ориентационные карты, полученные в EBSD-режиме, для: образца № 1 (а, б); образца № 2 (в, г); образца № 3 (д, е).

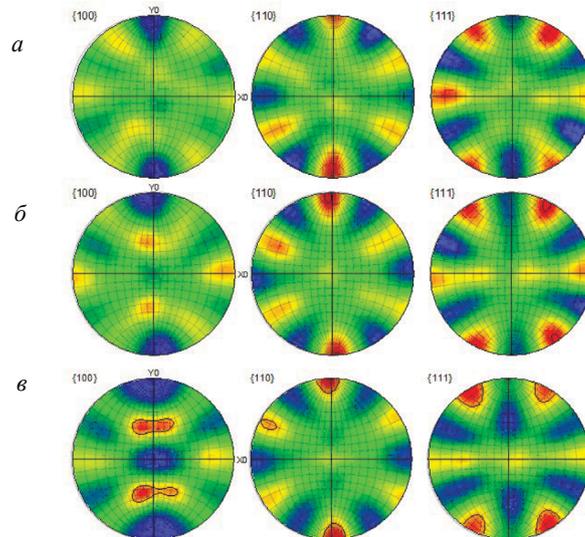


Рис. 3. Прямые полюсные фигуры: образец 1 (а); образец 2 (б); образец 3 (в).

Согласно классификации текстур, проведенной в [9, 10], в исследуемых прокатанных образцах формируется типичная для ГЦК-материалов ограниченная текстура прокатки $\{110\}\langle 111\rangle$, которая становится сильнее с увеличением степени деформации. При этом, с увеличением деформации в материале возникает многокомпонентная текстура, включающая, наряду с ГЦК-текстурой прокатки, слабо выраженную текстуру Госса $\{110\}\langle 001\rangle$, характерную для деформированных ОЦК-металлов, что связано, вероятно, с появлением мартенсита деформации. Степень рассеяния текстуры в образце № 3 (55 % деформации) возрастает до 20° .

Согласно литературным данным, кристаллическая решетка образующегося в стали мартенсита закономерно ориентирована по отношению к решетке исходной фазы [11]. Ориентационные соотношения Курдюмова—Закса (К—З) для ГЦК—ОЦК-фазового перехода выполняются и для мартенсита деформации, который в малоуглеродистых сталях также имеет ОЦК-структуру [12]:

$$\{111\}_{\text{ГЦК}} \parallel (011)_{\text{ОЦК}}, [10-1]_{\text{ГЦК}} \parallel [1-11]_{\text{ОЦК}}$$

Поскольку в кубической кристаллической решетке существует четыре кристаллографически равноценных плоскости $\{111\}$, то, согласно ориентационным соотношениям К—З, плоскость кубического мартенсита $\{011\}$ может быть параллельна любой из плоскостей $\{111\}$ в ГЦК-решетке. Также, при таком выборе ориентации между ОЦК и ГЦК-кристаллическими решетками будет существовать шесть кристаллографически эквивалентных направлений в ГЦК-кристаллической решетке, которым будут параллельны направления в решетке ОЦК-мартенсита. Таким образом, при обычном фазовом переходе будет 24 эквивалентных способа (варианта) расположения решетки мартенсита относительно решетки аустенита. В случае формирования ограниченной текстуры прокатки в исходном аустенитном состоянии материала мартенсит деформации будет формироваться, в первую очередь, в кристаллографически благоприятно расположенных зернах. Такую благоприятную ориентацию зерна можно видеть на рис. 2б, угол между направлениями $\langle 100\rangle$ и $\langle 111\rangle$ в кубической системе составляет $54^\circ 44'$, а между плоскостями $\{110\}$ и $\{111\}$ — $35^\circ 16'$. На рис. 2, 3 направление проката НП совпадает с нормалью к плоскости $\{110\}$.

Результаты магнитно-силовой микроскопии

Магнитно-силовая микроскопия обеспечивает «визуализацию» магнитных силовых линий и получение субмикронного пространственного распределения картины сил магнитного взаимодействия между зондом, покрытым ферромагнитным материалом, и исследуемым образцом. Появление в образце мартенсита деформации подтверждается с помощью магнитно-силовой микроскопии. Изображения были получены в бесконтактном режиме с использованием двухпроходной техники, позволяющей визуализировать неоднородность магнитной силы, действующей на зонд со стороны образца. В этом случае исключается влияние рельефа поверхности образцов на результаты магнитно-силового сканирования. При регистрации изменений фазы колебаний магнитного зонда формируется изображение распределения z -компоненты градиента магнитной силы по поверхности образца. Расстояние, на котором измерялись дальнедействующие магнитные силы, составляло $h = 150$ нм от поверхности образца в каждой точке сканирования. На рис. 4 показаны магнитно-силовые изображения деформированных образцов. В исходном состоянии образцы были парамагнитны, и никаких магнитных особенностей в их структуре обнаружено не было. В структуре деформированных образцов можно видеть темные крупные зерна парамагнитного аустенита, которые однородны по интенсивности. При этом ферромагнитный мартенсит деформации на магнитно-силовом изображении выглядит как светлые игольчатые параллельные вытянутые магнитные структуры внутри аустенита. Количество и плотность магнитных структур увеличивается с увеличением деформации (см. рис. 4).

Похожая магнитная доменная структура мартенсита деформации была получена с помощью магнитно-силового микроскопа в работе [12], где было показано различие магнитной доменной структуры феррита и образующего при деформации ОЦК-мартенсита в низкоуглеродистых сталях.

Магнитные измерения

В табл. 2 представлены результаты магнитных измерений. Относительная магнитная проницаемость образцов до деформации составила 1,003, что свидетельствует о практически полном отсутствии в них феррита, это дополнительно было подтверждено с помощью измерений на установке сильных магнитных полей. Коэрцитивная сила исследуемых образцов после деформации оказалась выше 100 А/см, что значительно выше значений, характерных для магнитомягкой фазы

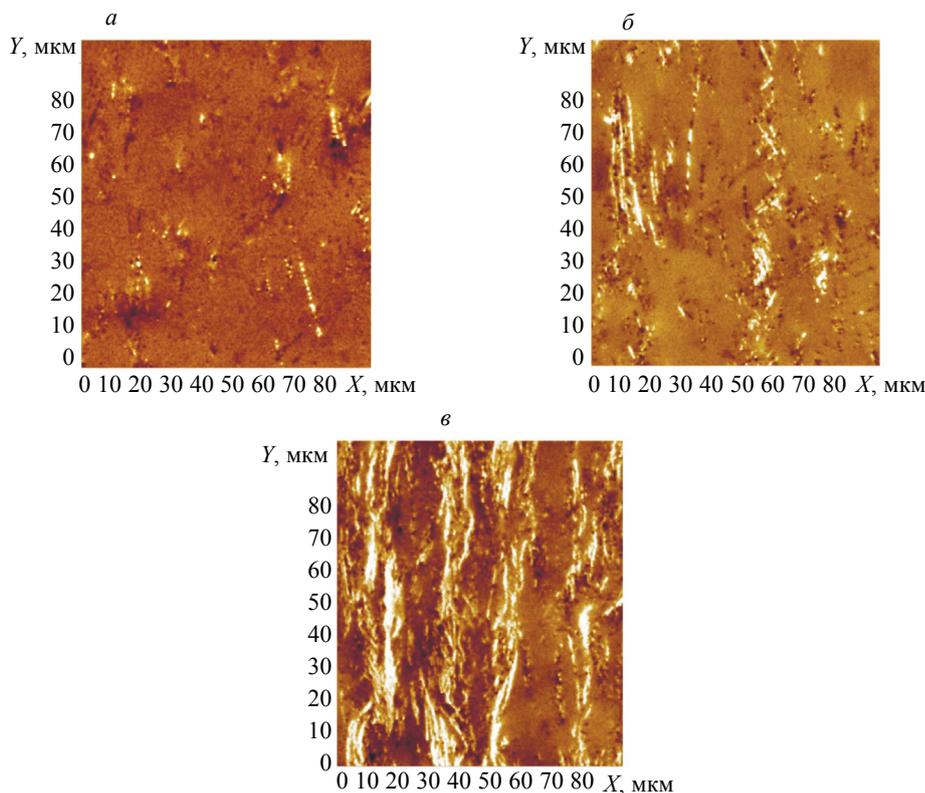


Рис. 4. Магнитно-силовые изображения мартенсита в деформированных образцах: образец 1 (а); образец 2 (б); образец 3 (в).

Таблица 2

Результаты магнитных измерений исследуемых образцов после деформации прокаткой

№ образца	Деформация, %	Намагниченность насыщения, кА/м	Содержание мартенсита, %	Относительная магнитная проницаемость μ	
				Перпендикулярно направлению прокатки	По направлению прокатки
1	16	15	1,5	1,036±0,003	1,045±0,003
2	31	42	4	1,267±0,003	1,283±0,003
3	55	88	8	1,485±0,003	1,530±0,003

феррита (15—16 А/см [8]). Следовательно, можно считать, что изменение магнитных свойств после деформации будет свидетельствовать о фазовом превращении с образованием ферромагнитного мартенсита деформации [13, 14].

Как можно увидеть в табл. 2, наблюдается различие в значениях относительной магнитной проницаемости в зависимости от положения (ориентации) датчика прибора при измерении. Это различие существенно превышает погрешность прибора «ФерроКОМПАС», что позволяет говорить о проявлении анизотропии величины μ в образцах аустенитной стали после процедуры прокатки.

ВЫВОДЫ

1. Выявлена связь между текстурой, изменением фазового состава и магнитной анизотропией в аустенитной стали 09X17H5Ю после деформации прокаткой при комнатной температуре. При-

чиной возникновения магнитной анизотропии в аустенитной стали с отсутствием феррита в исходном состоянии является формирование мартенсита деформации в благоприятно ориентированных к фазовому переходу ГЦК—ОЦК-зернах.

2. Показано, что метод локального анализа магнитных полей прибором «ФерроКОМПАС» в деформированных прокаткой аустенитных образцах, при образовании в них мартенсита деформации, чувствителен к проявлению анизотропии магнитных свойств. Появление анизотропии относительной магнитной проницаемости может быть использовано для обнаружения мест зарождения и развития дефектов, вызванных образованием мартенсита деформации.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Меринов П.Е., Бекетов Б.И., Рунов А.Е., Рабеништайнер Г.* Корреляционная зависимость различных методов контроля содержания ферритной фазы при сварке (наплавке) аустенитных сталей // Сварочное производство. 1984. № 9. С. 34—36.

2. *Ригмант М.Б.* Методы и средства контроля фазового состава двух- и трехфазных аустенитных сталей // Дефектоскопия. 2018. № 2. С. 27—40.

3. Пат. RU U1 РФ, МПК G01N27/72, G01N27/87 № 179753. Прибор для локального измерения ферромагнитной фазы в аустенитных сталях / М.Б. Ригмант, М.К. Корх, А.П. Ничипурук. Заявл. 28.12.2017. Оpubл. 23.05.2018. Бюл. № 15.

4. *Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Худорожкова Ю.В., Корзунин Г.С.* Влияние типа кристаллографической текстуры на анизотропию параметров магнитных полей рассеяния стального листового проката // Физ. мезомеханика. 2019. Т. 22. № 3. С. 54—64.

5. *Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Povolotskaya A.M., Goruleva L.S., Veretennikova I.A., Kamantsev I.S.* The Application of Magnetic Structural Phase Analysis for the Diagnostics of the State of a 08X18H10T Steel—C 3 Steel Composite Material and Its Components That Were Subjected to Plastic Deformation // Russian Journal of NDT. 2012. V. 48. No. 6. P. 343—356.

6. *Чечерников В.И.* Магнитные измерения / Под ред. проф. Е.И. Кондорского. М.: Изд-во Московского университета, 1963. 286 с.

7. *Кулеев В.Г., Михеев М.Н., Ригмант М.Б., Нестеренко В.В., Лобанова Л.В., Назаров Ю.И., Гузев С.Т.* К проблеме контроля магнитного состояния ферромагнитных сталей при воздействии на них магнитных полей и упругих напряжений в зарелевской области // Дефектоскопия. 1985. № 10. С. 32—42.

8. *Вонсовский С.В.* Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферромагнетиков. М.: Наука, 1971. 1032 с.

9. *Лобанов М.Л., Юровских А.С., Кардонина Н.И., Русаков Г.М.* Методы исследования текстур в материалах / Учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 115 с.

10. *Даниленко В.Н., Миронов С.Ю., Беляков А.Н., Жилев А.П.* Применение EBSD анализа в физическом материаловедении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. № 3. Т. 78. С. 28—46.

11. *Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И.* Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977. 238 с.

12. *Ригмант М.Б., Корх М.К., Давыдов Д.И., Шишкин Д.А., Корх Ю.В., Ничипурук А.П., Казанцева Н.В.* Методы выявления мартенсита деформации в аустенитно-ферритных сталях // Дефектоскопия. 2015. № 11. С. 28—42.

13. *Гуляев А.П.* Металловедение. М.: Металлургия, 1978. 648 с.

14. *Лейкин А.Е., Родин Б.И.* Материаловедение. Учебник для машиностроит. специальностей. М.: Высшая школа, 1971. 416 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЦИРКОНИЯ АКТИВНЫМ ТЕПЛОВЫМ МЕТОДОМ

© 2021 г. С.Е. Черных^{1,*}, В.Н. Костин^{1,**}, Ю.И. Комоликов^{1,***}

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

E-mail: *suo@mail.ru; **kostin@imp.uran.ru; ***yikom@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.11.2021; после доработки 22.11.2021

Принята к публикации 29.11.2021

Методом одностороннего активного теплового неразрушающего контроля по анализу радиационных температур исследована возможность контроля поверхностного окисления циркония. На различных стадиях и температурах нагрева в инфракрасном диапазоне длин волн оценена излучательная способность окисленной поверхности циркониевых образцов, полученных при различных температурах отжига. Показано, что существует принципиальная возможность дистанционно контролировать процесс окисления циркониевых сплавов, применяемых в атомной промышленности для изготовления тепловыделяющих элементов, работающих в активной зоне ядерных реакторов.

Ключевые слова: цирконий, окисление, дефектоскопия, термография, тепловой контроль.

DOI: 10.31857/S0130308221120071

ВВЕДЕНИЕ

Цирконий (Zr) обладает высокой температурой плавления ($T_{пл} = 2025$ К) и имеет две полиморфные модификации: α_{Zr} (низкотемпературная модификация с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решеткой) и β_{Zr} (высокотемпературная модификация с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой). Плотность циркония при 293 К — 6,5 г/см³. Широкое использование его в современных реакторах на тепловых нейтронах обусловлено, прежде всего, тем, что он характеризуется малой долей «паразитного» поглощения нейтронов в активной зоне. По сечению поглощения тепловых нейтронов цирконий уступает лишь таким металлам, как магний и бериллий (магний 0,06 барна, бериллий 0,09 барна, цирконий 0,18 барна) [1]. При использовании циркония в конструкциях активных зон реакторов его легируют. Так, в отечественных реакторах ВВЭР-1000 (водо-водяной энергетический реактор) в качестве оболочечного материала ТВЭЛов (тепловыделяющий элемент) используется сплав Э110 (Zr легируемый (0,9—1,1) % Nb). В реакторах типа РБМК (реактор большой мощности канальный) используется сплав Э125 (Zr легируемый (2,1—2,5) % Nb). Более полный список используемых сплавов циркония приведен в [2]. Важность использования циркония и его сплавов в ядерных технологиях вызывает значительное число прикладных исследований, особый интерес представляют работы по изучению взаимодействия циркония и кислорода [3—5]. Одним из основных химических свойств циркония является высокое сродство к кислороду, основанное на том, что его валентные оболочки содержат четыре электрона, которые он легко отдает. В системе Zr—O образуется единственно устойчивый окисел ZrO₂, существующий в трех кристаллических модификациях: моноклинная α -ZrO₂, тетрагональная β -ZrO₂, кубическая γ -ZrO₂ [4].

Все три модификации являются взаимно обратимыми и переходят одна в другую при определенной температуре α -ZrO₂ ↔ β -ZrO₂ ↔ γ -ZrO₂. Кубическая фаза существует в температурном интервале 2370—2706 °С. Плотность кубической фазы равна 6,27 г/см³. Тетрагональная фаза существует в интервале температур 2370—1170 °С, плотность тетрагонального диоксида циркония 6,1 г/см³. При температурах ниже 1170 °С ZrO₂ существует в моноклинной модификации (плотность 5,56 г/см³) [4]. На практике процесс взаимодействия циркония с кислородом очень сложен. Стадии образования устойчивого оксида (ZrO₂) предшествуют процессы, где образуются низшие окислы (Zr₂O, ZrO и Zr₂O₃) и некоторые метастабильные соединения [3].

Наиболее высокой стойкостью при окислении обладает чистый цирконий, и любое легирование его различными элементами приводит к увеличению скорости коррозии [6]. При этом скорость взаимодействия во многом зависит от температуры.

Циркониевые сплавы, легированные ниобием, обладают высокой коррозионной стойкостью только при температурах до 300—400 °С [7]. В интервале 450—800 °С начинается неконтролируемый рост оксидного слоя, сопровождающийся появлением трещин и пор, его отслаиванием от

металла, и, таким образом, препятствие к дальнейшему поглощению кислорода устраняется, начинается разрушающееся окисление циркония. В пароводяной среде окисление циркония водой происходит в экзотермической реакции:



Взрывообразный характер протекания реакции (1) с большим выделением тепла (Q_p) и водорода представляет большую опасность с точки зрения разгерметизации и теплового взрыва реактора [8]. Интенсивность этой реакции в воде до 300 °С из-за наличия защитной оксидной пленки пренебрежимо мала. Цирконий интенсивно начинает взаимодействовать с водой и паром лишь при повышении температуры и неконтролируемой деградации оксидной пленки [7]. Поэтому можно считать, что контроль состояния оксидной пленки, образующейся на циркониевом сплаве, является одним из условий безопасной эксплуатации реактора. В данной работе методом теплового контроля исследовали изменение свойств образующегося на цирконии оксидного слоя по мере его роста и перехода от бездефектного состояния к дефектному.

Преимуществами применения активного теплового неразрушающего контроля в промышленности является оперативность испытаний в сочетании с безопасностью, обеспечиваемой в первую очередь бесконтактностью рассматриваемого метода [9].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

Материал исследования — сплав марки Э-110 (ТУ 95.166-83), используемый для изготовления тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) для активной зоны ядерных реакторов. Образцы для исследования изготавливали в виде цилиндров диаметром 10 мм и длиной 15 мм. Формирование оксидной пленки на образцах осуществляли методом термического стимулирования. Для этого проводили термообработку образцов в лабораторной электропечи при температурах, °С: 600, 700, 800, 900 и 1100 в атмосфере воздуха при скорости нагревания 5 °С в минуту и выдержкой при максимальной температуре в течение одного часа. Данные по образцам приведены в табл. 1.

Таблица 1

Образцы для испытаний

Номер образца	Температура отжига на воздухе T_0 , °С
0	Без термообработки
1	600
2	700
3	800
4	900
5	1100

В условиях эксперимента не проводили измерение толщины образовавшегося оксидного слоя на образцах. Это важно, но в данной работе не контролировалось. Основной контролируемой характеристикой была радиационная температура поверхности образцов, прошедших предварительную термообработку для создания разной степени окисления поверхности (см. табл. 1), нагретых до одинаковой температуры. Таким образом, косвенно исследовался коэффициент излучения оксидного слоя образцов в инфракрасном диапазоне [10].

Термографирование полученных образцов производили при различных стадиях и температурах нагрева [11]. Нагрев производился с нижней торцевой поверхности образцов, при этом остальная поверхность образцов соприкасалась с окружающим воздухом [12]. Роль источника тепловой стимуляции выполнял плоский электрический нагревательный элемент мощностью 1 кВт. Температура поверхности источника варьировалась в диапазоне от 21 до 394 °С. Распределение тепловых полей на наружной поверхности образцов фиксировали с помощью инфракрасной камеры FLIR T620bx компании Flir Systems, США. Основные характеристики используемой камеры: разрешение 640×480 пикселей, пространственное разрешение 0,68 мрад, температурная чувствительность < 40 мК, спектральный диапазон 7,85—14 мкм. Были выбраны



Рис. 1. Внешний вид образцов после термообработки.

оптимальные углы и расстояния съемки. После проведения оптимизации окончательную съемку проводили при дистанции наблюдения 400 мм.

На рис. 1 представлен вид образцов после термоокисления (см. табл. 1). Видно, что цвет образцов по мере увеличения температуры, а значит и глубины окисления, меняется от исходного металлического на черный, серо-голубой и белый. Структура и состав пленки также изменяются, и, как следствие, меняются теплофизические характеристики.

Известно, что процесс окисления циркония проходит в две стадии. Первоначальная стадия — это образование плотной сплошной защитной пленки, прочно сцепляющейся с металлом. Структура этой пленки представлена двумя слоями: слой насыщенного раствора кислорода в цирконии и поверхностный слой нестехиометрического оксида ZrO_{2-x} (черный цвет поверхности — признак нестехиометричности) [13]. В этих слоях, согласно диаграмме состояния (рис. 2), реализуются различные кристаллические структуры в зависимости от температуры и концентрации кислорода [14]. На первой стадии защитного окисления с ростом толщины защитной пленки замедляется диффузия кислорода в металл и постепенно уменьшается скорость окисления.

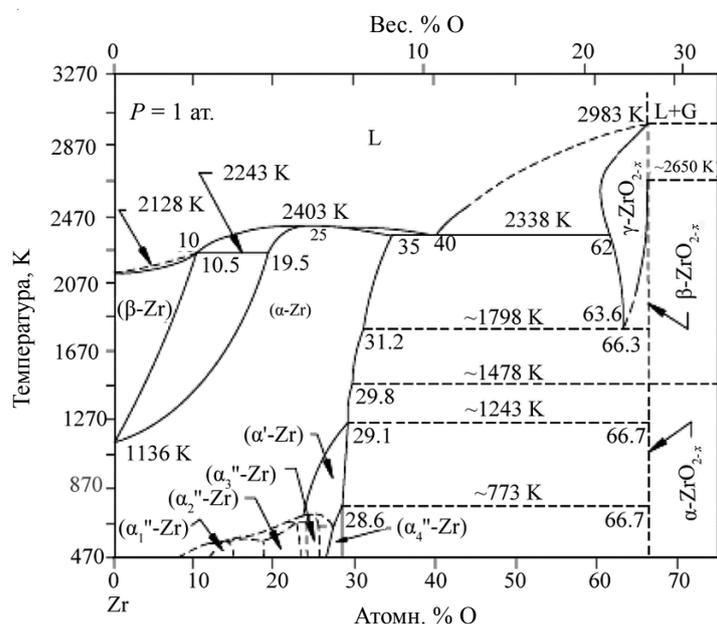


Рис. 2. Диаграмма состояния цирконий—кислород [14].

На второй стадии, по мере дальнейшего присоединения кислорода и затруднения его миграции вглубь металла, уменьшается нестехиометричность образующегося поверхностного ZrO_2 . Поскольку при переходе от Zr к устойчивому ZrO_2 происходит сильное изменение удельного объ-

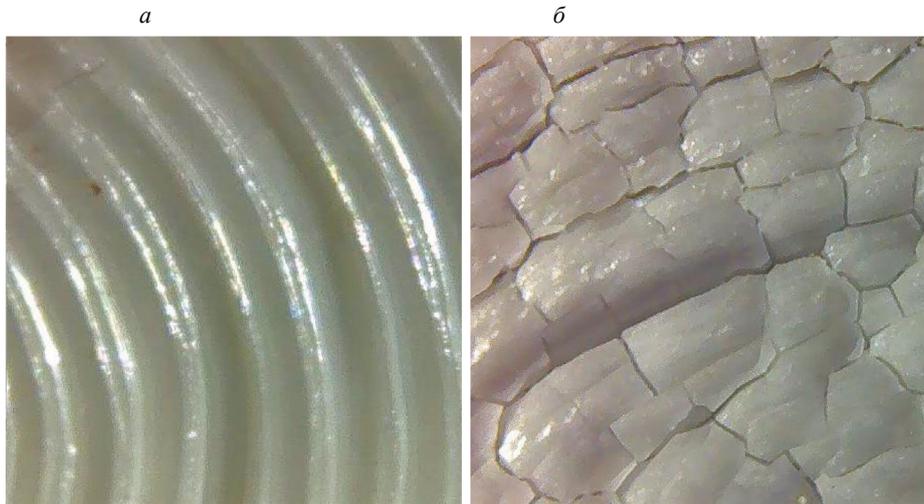


Рис. 3. Фрагменты окисленной поверхности образца:
а — этап защитного окисления; *б* — этап разрушающего окисления.

ема (более 55 %) [13, 14], это вызывает значительные механические напряжения. Рост упругих напряжений и несоответствия структур металла и оксида приводят в итоге к разрушению поверхностной пленки, возникает система трещин и пор (рис. 3), что обеспечивает быструю миграцию кислорода по дефектам вглубь металла и ускорение коррозии — эта стадия характеризуется как разрушающее или катастрофическое окисление. В работе [6] кинетика окисления циркония описывается степенной зависимостью от времени:

$$\Delta M = A\tau^n, \quad (2)$$

где ΔM — привес массы оксида; τ — время; а A и n — постоянные.

Авторы работы [6] считают, что на начальном этапе окисления величина n составляет 0,5. При достижении толщины в 1 мкм скорость окисления уменьшается и $n = 0,33$. Такой процесс продолжается до толщины 3 мкм (критическая толщина), после чего происходит взрывной рост оксида (момент перелома). При этом показатель степени n увеличивается до 1. При достижении критической толщины в пленке образуются микропоры и микротрещины, через которые проникает кислород. Этот процесс продолжается с постоянной скоростью до достижения толщины пленки в 50—60 мкм, после чего она становится рыхлой и осыпается.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе эксперимента получены следующие термоизображения окисленных поверхностей образцов:

до нагрева (рис. 4*а*);

при температурах нагревателя: 48 °С (рис. 5*а*), 113 °С (рис. 6*а*), 160 °С (рис. 7*а*), 304 °С (рис. 8*а*), 394 °С (рис. 9*а*);

через 12 мин после отключения питания нагревателя при остывании на воздухе до температуры 158 °С (рис. 10*а*);

с использованием промежуточной пластины нагревателя (для более равномерного нагрева образцов) при температуре 161 °С (рис. 10*в*).

На рис. 4*б*—10*б* представлены графики зависимости радиационных температур образцов от их температуры отжига на воздухе.

Анализируя термограмму на рис. 4*а* можно сделать вывод о том, что еще до начала тепловой стимуляции образцы имеют различную радиационную температуру, хотя при этом истинная их температура одинаковая и имеет значение близкое к значению температуры воздуха в помещении. Разница температур между образцами обусловлена различным коэффициентом излучения у различных покрытий, которое сформировано на поверхности образцов.

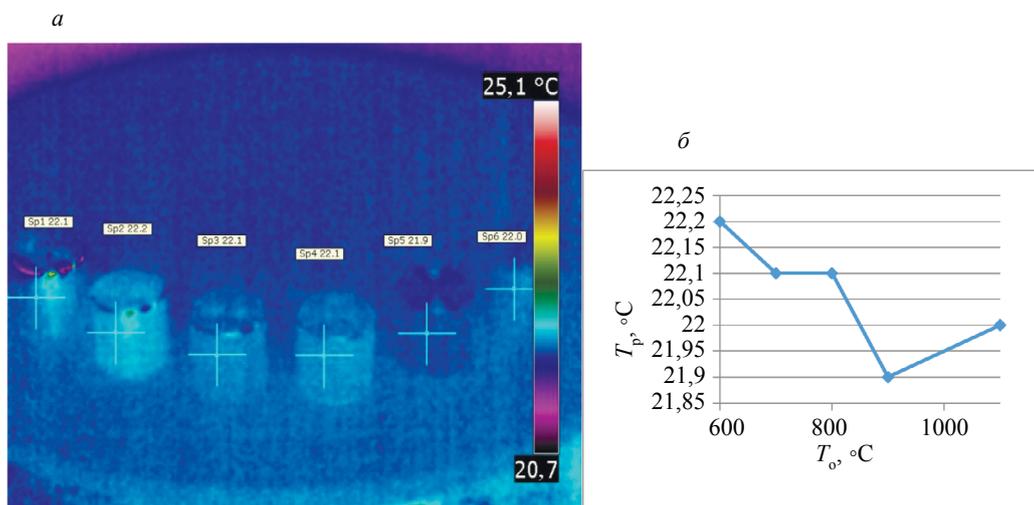


Рис. 4. Термограмма образцов до нагрева (а) и график зависимости радиационных температур T_p от температур отжига T_o (б). Здесь и далее точки на кривых соответствуют образцам 1—5 (см. табл. 1).

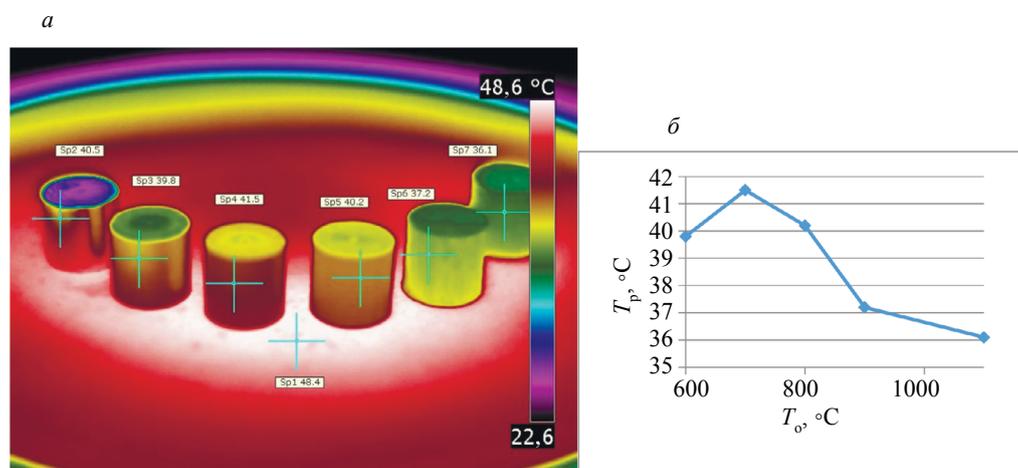


Рис. 5. Термограмма образцов при температуре нагревателя 48 °C (а) и график зависимости радиационных температур T_p от температуры отжига T_o (б).

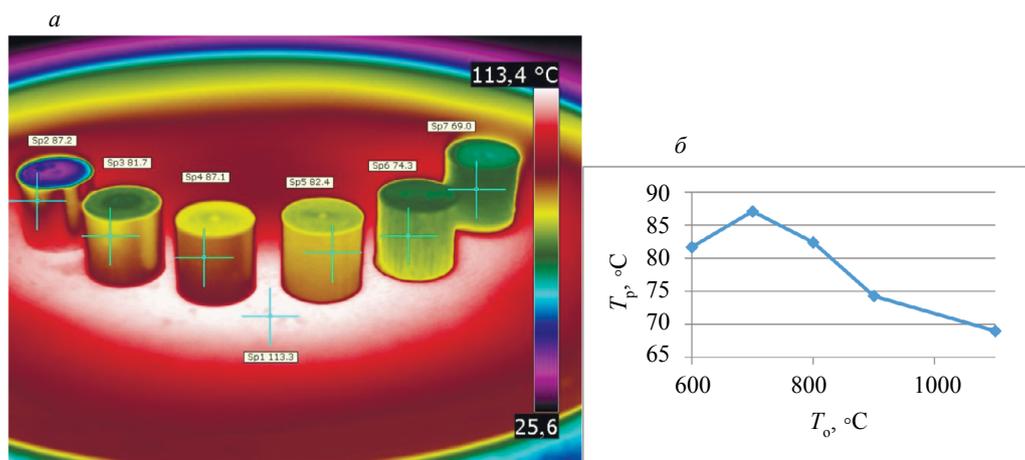


Рис. 6. Термограмма образцов при температуре нагревателя 113 °C (а) и график зависимости радиационных температур T_p от температуры отжига T_o (б).

Таким образом, можно предположить, что, анализируя инфракрасное излучение от поверхностей с различной степенью оксидирования, можно найти зависимость радиационной температуры одинаково нагретых объектов от характеристик этих поверхностей (см. рис. 4б).

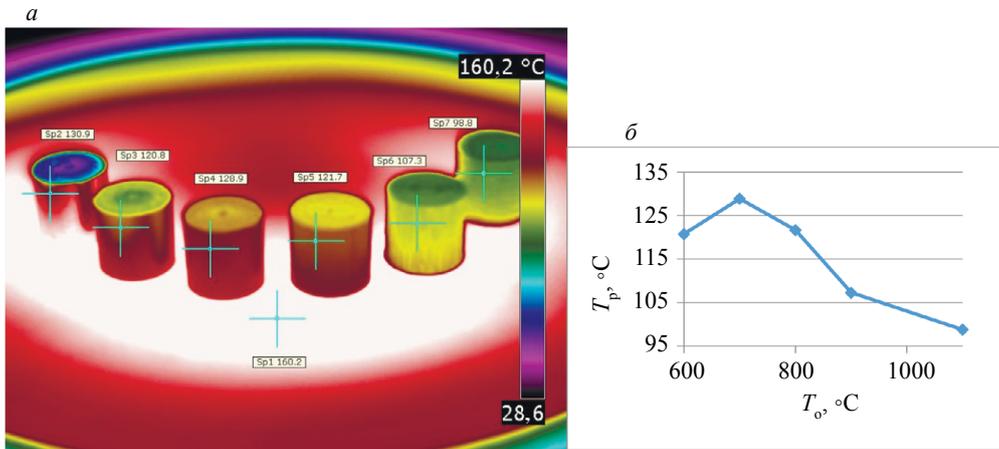


Рис. 7. Термограмма образцов при температуре нагревателя 160 °С (а) и график зависимости радиационных температур T_p от температуры отжига T_o (б).

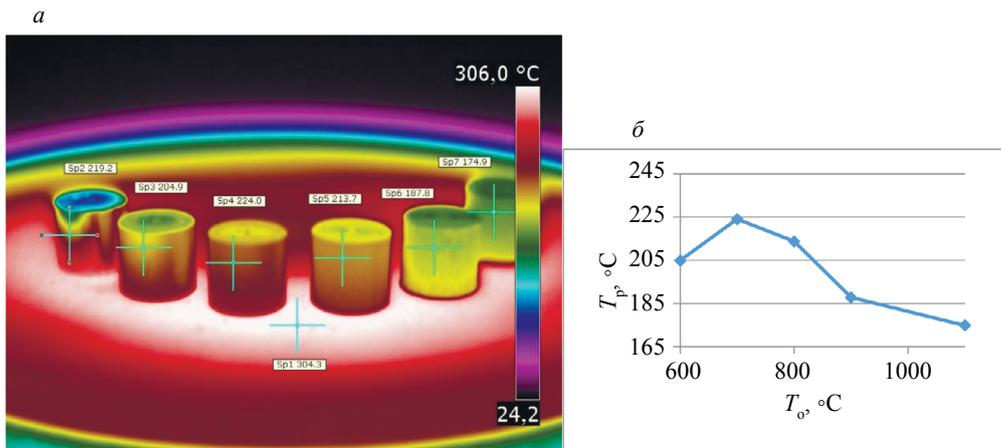


Рис. 8. Термограмма образцов при температуре нагревателя 304 °С (а) и график зависимости радиационных температур T_p от температуры отжига T_o (б).

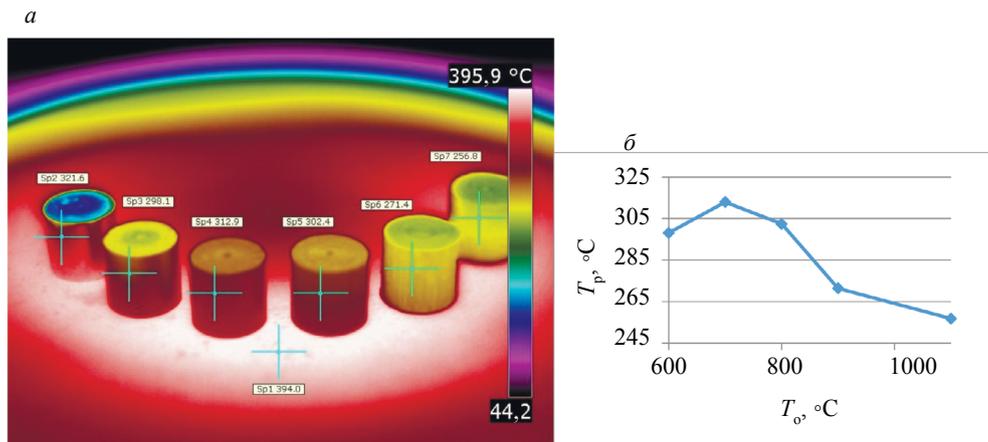


Рис. 9. Термограмма образцов при температуре нагревателя 394 °С (а) и график зависимости радиационных температур T_p от температуры отжига T_o (б).

Согласно термограммам, представленным на рис. 5а—9а можно сделать вывод, что при нагреве образцов значительно выше температуры воздуха тенденция зависимости радиационной температуры от покрытия образцов сохраняется, увеличивается при этом и разность радиационных температур между образцами. В то же время при увеличении номера образца радиационная температура имеет тенденции к уменьшению (рис. 5б—9б).

При остывании образцов на воздухе происходит более равномерное распределение тепла, как по поверхности нагревателя, так и образцов (см. рис. 10а). При этом также сохраняется зависимость температуры поверхности от степени окисления (см. рис. 10б).

При использовании промежуточной пластины нагревателя происходит более равномерный нагрев образцов (см. рис. 10в), при этом также сохраняются температурные тенденции зависимости температуры поверхности от номера образца (см. рис. 10г).

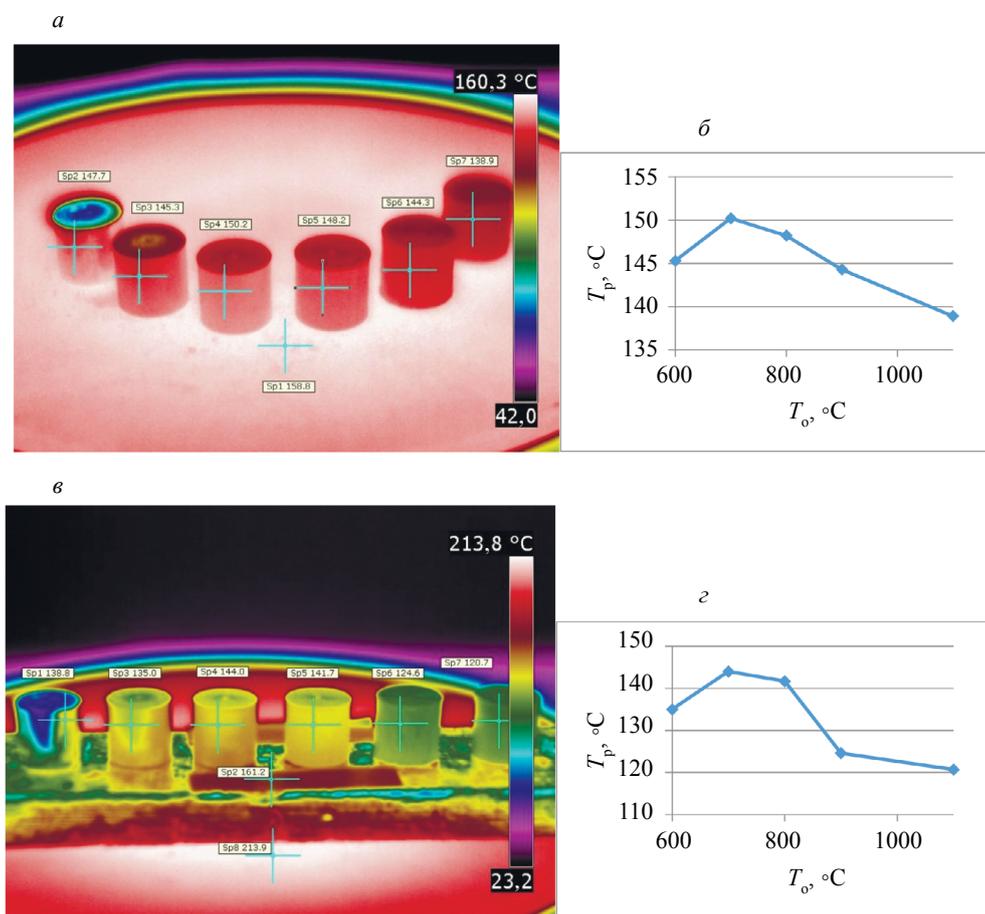


Рис. 10. Термограмма образцов при остывании на воздухе в течение 12 мин до температуры нагревателя 158 °С (а) и график зависимости радиационных температур T_p от температуры отжига T_o (б), термограмма образцов с промежуточной пластиной нагревателя при температуре 161 °С (в) и график зависимости радиационных температур T_p от температуры отжига T_o (г).

Анализ термограмм показывает, что абсолютные значения радиационных температур торцов оказались меньше, чем на цилиндрической части образцов. Отсюда можно сделать вывод, что коэффициент излучения торцевых поверхностей ниже, вероятно из-за того, что характеристики сформированного покрытия на торцевой части образцов отличаются от характеристик покрытия цилиндрической части. При этом сохраняется зависимость радиационной температуры от степени окисления образцов.

Неравномерность температурного поля поверхности образца № 0, а также пониженные значения его радиационной температуры на термограммах можно объяснить изначально низким коэффициентом излучения, характерным для чистого металла.

Можно предположить, что подобный вид исследований может быть продолжен с помощью других схем [12] одностороннего теплового контроля при соответствующих температурах внешнего источника нагрева [15].

ВЫВОДЫ

Взаимодействие циркониевых сплавов и кислорода определяют такие основные факторы, как высокое сродство циркония к кислороду, химический состав и температура. Эти факторы обуславливают окисление поверхности изделий из циркониевых сплавов в процессе работы. Окисление циркония проходит в два этапа: защитное окисление и разрушающее. Рост толщины и деградацию оксидной пленки необходимо контролировать.

Установлена зависимость радиационной температуры (коэффициента излучения) равнонагретых образцов, имеющих разную степень окисления. Результаты исследований показывают, что данный подход может быть использован для дистанционного контроля стадии окисления объектов из циркония по анализу их радиационной температуры в инфракрасном диапазоне длин волн электромагнитного спектра.

Таким образом, радиационная температура оказывается структурно-чувствительной характеристикой окисленного слоя и может быть положена в основу теплового неразрушающего контроля его состояния.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / Учебное справочное пособие для студентов специальностей: 14.03.05 Ядерные реакторы и энергетические установки; 14.04.04. Атомные электрические станции и установки / Под общ. ред. проф. П.Л.Кириллова; 2-е изд. перераб. и доп. М.: ИздАт, 2007. 200 с.
2. Калинин Б.А., Платонов П.А., Чернов И.И., Штромбах Я.И. Физическое материаловедение. Т. 6. Ч. 1. Конструкционные материалы ядерной техники. М.: МИФИ, 2008. 642 с.
3. Исаев А.Н. Перспективы развития ядерной энергетики — реакторы средней и малой мощности // Атомная техника за рубежом. 2007. № 2. С. 3—9.
4. Akebi M. Technical aspects at early days of nuclear development-birth of zirconium alloys and channel type reactors // Nuclear Safety Research Association. Kharkov. Nov. 2003. 12—16 p.
5. Chevalier P.Y., Fischer E. Thermodynamic modelling of the O-U-Zr system // J. Nucl. Mater. 1998. V. 257. № 3. P. 213—255.
6. Герасимов В.В. Коррозия реакторных материалов. М.: Атомиздат, 1983. 197 с. Vienna: IAEA, 1985, Тес. Док. 356.
7. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Т. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. М.: Энергия, 1981. 231 с.
8. Nishino Y., Krauss A., Lin Y., Gruen D.M. Initial oxidation of zirconium and zircaloy-2 with oxygen and water vapor at room temperature // J. Nucl. Mater. 1996. V. 228. № 3. P. 346—353.
9. Вавилов В.П. Неразрушающий контроль: справочник / В 7 т. Т. 5. В 2 кн. Кн. 1 / Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. 418 с.
10. Vavilov V.P. Thermal nondestructive testing of materials and products: a review // Russ. J. Nondestruct. Test. 2017. V. 53. No. 10. P. 707—730.
11. Вавилов В.П., Чулков А.О., Дерусова Д.А., Пань Я. Новые идеи в активном тепловом контроле // В мире неразрушающего контроля. 2016. № 1. С. 5—7.
12. Вандельт М., Крёгер Т., Йоханнес М. Активная термография — эффективный метод неразрушающего контроля крупногабаритных изделий из композиционных материалов // В мире неразрушающего контроля. 2016. № 1. С. 8—12.
13. Стрекаловский В.Н., Полежаев Ю.М., Пальгуйев С.Ф. Оксиды с примесной разупорядоченностью. М.: Наука, 1987. 160 с.
14. Tsuji T., Amaya M. Study on order-disorder transition of Zr—O alloys (O/Zr=0—0,31) by heat capacity measurement // J. Nucl. Mater. 1995. V. 223. No. 1. P. 33—39.
15. Silva A.R., Vaz M., Leite S., Mendes J. Non-destructive infrared lock-in thermal tests: update on the current defect detectability // Russ. J. Nondestruct. Test. 2019. V. 55. No. 10. P. 772—784.

В статье Р. С. Гайсин, В. Ю. Тюканько, А. В. Демьяненко «**РАЗРАБОТКА МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РОТАЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ**», опубликованной в № 11, 2021 года, адрес следует читать ¹НАО «СКУ» им. М. Козыбаева, Республика Казахстан 150000 Петропавловск, ул. Пушкина, 86.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РОТАЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ

© 2021 г. Р.С. Гайсин^{1,*}, В.Ю. Тюканько^{1,**}, А.В. Демьяненко^{1,***}

¹НАО «СКУ» им. М. Козыбаева, Республика Казахстан 150000 Петропавловск, ул. Пушкина, 86
E-mail: *raikoshan001@mail.ru; **vetal3333@mail.ru; ***demianenkoav@mail.ru

Памяти профессора Гелия Васильевича Ломаева

17 октября 2021 года в возрасте 82 лет скоропостижно скончался доктор технических наук, профессор кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» Гелий Васильевич Ломаев.

Гелий Васильевич родился 19 ноября 1938 года в селе Гольяны Удмуртской АССР на берегу реки Камы. Первый класс закончил в городе Выборге, был сыном полка воинской части Выборгской крепости. С переездом семьи в г. Сарапул (УАССР) продолжил обучение в средней школе. Далее с отличием закончил Сарапульский электромеханический техникум (1953—1957 гг.) по специальности техник-технолог радио-аппаратостроения.

В 1957 году поступил в Ижевский механический институт (ИМИ), образованный в 1952 году, учился на механико-технологическом и приборостроительном факультетах, закончил обучение в 1962 году по специальности радиоинженер. В период с 1962 по 1971 гг. работал конструктором на Электромеханическом заводе г. Ижевска.

После окончания очной аспирантуры у профессора Тихонова Г.А. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Элементы и узлы вычислительной техники» в диссертационном совете Ленинградского ордена Ленина Электротехнического института им. В.И. Ульянова (Ленина), утвержденную ВАК 28 января 1972 года. Работал ассистентом и доцентом кафедры Вычислительная техника.

В 1973 году был назначен заведующим кафедрой «Электротехника», в дальнейшем переименованную в «Детали приборов», которой заведовал до 1984 года. В течение 10 лет был членом Научного совета АН СССР по проблемам физики твердого тела.

В 1981 году выступил инициатором открытия в ИМИ специальности 19.02.00 (тогда 0653) «Физические методы и приборы неразрушающего контроля» и активно работал над ее развитием. Основатель научной школы в области исследований метода эффекта Баркгаузена (МЭБ) в неразрушающем контроле (НК). Представлял доклад в ГКНТ при СМ СССР о перспективности проведения исследований в области эффекта Баркгаузена и сопутствующих ему магнитных шумов. Постановлением ГКНТ при СМ СССР головной организацией в данной области назначен ИМИ. Результатом стало внесение МЭБ в ГОСТ 18353—79. Гелий Васильевич — инициатор и председатель Международной школы-семинара «Эффект Баркгаузена и его использование в науке и технике». На основе эффекта Баркгаузена и сопутствующих ему магнитных шумов разработал теорию толщинометрии упрочненных и разупрочненных слоев, полученных путем термической, химико-термической и механической обработок ферромагнитных материалов.

Гелий Васильевич являлся специалистом III-го уровня по магнитному контролю. Он занимался аттестацией специалистов по неразрушающему контролю в рамках Учебно-аттестационного центра кафедры «Приборы и методы контроля качества». Был членом Координационного Совета РАН по проблеме «Физические неразрушающие методы контроля качества».

С 1984 по 1994 г. работал заведующим лабораторией в НИОТК (научно-исследовательский отдел технической кибернетики) и одновременно доцентом на кафедре «Приборы и методы контроля качества».

В 1998 г. Гелий Васильевич успешно защитил докторскую диссертацию на тему «Исследование метода эффекта Баркгаузена и его применение в измерениях, автоматике и контроле материалов и окружающей среды» в диссертационном совете Ижевского государственного технического университета (ИжГТУ). После защиты докторской диссертации организовал лабораторию физических методов исследований и метрологии в новом Удмуртском государственном НИИ сельского хозяйства РАСХН, где затем работал в должности заведующего кафедрой, одновременно преподавал в ИжГТУ на должности профессора.

Результаты научно-исследовательской деятельности Ломаева Г.В. отражены более чем в 200 публикациях, в том числе в 10 монографиях, 54 изобретениях. Его научные достижения:



информационно-структурная теория преобразователей «перемещение—код» (вал—код).
Теория и практика МЭБ в неразрушающем контроле;

теория, проектирование и внедрение магнитных компараторов (МК) на основе 2-х и 4-х стабильных ферромагнетиков;

теория и проектирование датчиков физических величин на основе эффекта Баркгаузена;

методы обнаружения, расчета и устранения магнитопатогенных зон урбанизированной среды, жилых и производственных помещений;

петля гистерезиса и ее параметры для отдельной пчелы, механизмы магниторецепции.

Подготовил 17 кандидатов наук.

В 2003 году создал вместе с другими пчеловодами Удмуртскую республиканскую общественную организацию пчеловодов «Мед Удмуртии» и возглавил ее. Создатель концепции апи-мониторинга (экологический мониторинг с использованием пчел и продуктов их жизнедеятельности). Член Международной славянской академии науки, образования, культуры и искусства. Организовал пять Всероссийских конференций «Высокие апитехнологии и апикультура» и 1-ю Республиканскую конференцию «Пчеловодство — 2000».

В последнее десятилетие активно занимался вопросами обнаружения и составления карт геомагнитопатогенных зон в городской среде. Гелий Васильевич как никто другой умел увлечь учеников научными идеями, пользовался заслуженным уважением среди коллег по научному сообществу.

Вечная память известному ученому и достойному человеку.

Редколлегия

WCNDT 2022 — 20-я международная выставка и конференция по неразрушающему контролю NDT

Когда:	28.02.2022 — 04.03.2022
Где:	Корея, Инчхон
Отрасль:	Неразрушающий контроль NDT
Тип:	выставки и конференции

Эта крупнейшая в отрасли НК и ТД выставка проходит 1 раз в 4 года (в 2000 году — Рим, 2008 — Шанхай, 2012 — Дурбан, 2016 — Мюнхен). Место проведения в Корее — Инчон, Songdo Convensia.

Отраслевая направленность конгресса WCNDT:

- Авиакосмическая, железнодорожная, автомобильная, судостроительная отрасли
- Нефтегазодобывающая, трубопроводная
- Архитектура и мостостроение
- Атомная промышленность, электроэнергетика
- Общая механика, материаловедение, производство и обработка
- Материалы (черные и цветные металлы, композиты, керамика, полимеры)
- Горное машиностроение
- Сертификация, тренинг
- Химия, нефтехимия, котлостроение
- Обработка данных, сенсоры
- Комплексные (безопасность, защита от радиации, оценка срока службы)
- Надежность систем контроля
- Стандартизация и др.

Методы тестирования: Радиографическое (RT), Ультразвуковое (UT), Акустико-эмиссионные (AT), Инфракрасное термографическое (TT), Капиллярное (LT), Магнитно-порошковое (MT), Проникающее (PT), Индукционное (ET), Визуальное (VT) и другие.

WCNDT 2008 прошел в Шанхае в октябре. И хотя конференция и выставка изначально планировались к проведению в августе и были перенесены на октябрь из-за ужасного землетрясения, в ней приняли участие 764 делегата, причем 530 приехали из 50 стран мира. Всего было рассмотрено 490 докладов, 436 устных и 54 постерных. Всего 202 компании и организации экспонировали здесь свою продукцию и услуги. Параллельно с конференцией прошла Генеральная ассамблея ICNDT, на которой Германское общество NDT (DGZfP) было признано принимающей организацией 19 WCNDT 2016 в Мюнхене.

WCNDT 2012 собрала 1552 участника из 89 стран мира, около 120 компаний принимали участие в выставке на площади около 7000 кв. м. В ходе 7 пленарных заседаний 33 докладчика представили обзор самых современных технологических решений для НК, рассмотрено и обсуждено 520 документов в ходе 8 параллельных сессий.

Также в Дурбане делегаты ICNDT проголосовали за проведение очередной 20-й WCNDT 2020 в Сеуле (Южная Корея), отклонив заявки Мехико и Рио-де-Жанейро.

WCNDT 2016 в Мюнхене собрала 2500 делегатов, а также 1400 посетителей выставки, в которой приняли участие 273 экспонентов, разместивших свои стенды на площади 3400 кв. м. В программный комитет форума поступило около 1000 тезисов докладов; в результате было проведено 670 презентаций в 9 параллельных сессиях и более 100 постерных презентаций.

Очередная конференция World Conference on Non Destructive Testing в Сеуле, COEX, в июне 2020 года не состоялась из-за коронавируса и перенесена на июнь 2021 года в Инчон.

Принимающая сторона: Korean Society for Nondestructive Testing (KSNT) в ассоциации с ICNDT.

RUSWELD 2022
Международная специализированная выставка
«Оборудование, технологии и материалы
для процессов сварки и резки»
24—27 октября 2022
ЦВК «Экспоцентр», павильон «Форум»

Выставка **Rusweld** проходит в рамках «Российской промышленной недели», которая объединяет ведущие мероприятия отрасли в центре Москвы на площадке ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР».

Выставка призвана представить передовые решения и мировые практики в сфере сварочного оборудования, материалов и технологий сваривания и резки металлов **с возможностью демонстрации технологических процессов в действии.**

Rusweld объединяет производителей, поставщиков и потребителей оборудования и продукции сварочной промышленности и призван поддержать развитие сварочной отрасли, а также продемонстрировать ее возможности и достижения.

Согласно приказу Минпромторга № 650 от 15.03.2015 доля импортозамещения сварочного оборудования должна составить не менее 49%. Для понимания масштабов предстоящей работы, в 2014 году доля импортозамещения составляла всего 10 %, в 2019 году — 20 %.

На выставке предусмотрена обширная деловая программа, в рамках которой предполагается рассмотреть вопросы состояния и развития отрасли, области применения новых технологий, взаимодействия государственных органов власти с ведущими участниками рынка.

ТЕМАТИКА

Сварочное оборудование, материалы, технологии сваривания.

Контроль качества на производстве: дефекты швов, соответствие изделия нормам и требованиям.

Оборудование и материалы для резки металла.

Инструменты и приспособления для сварочных работ.

Промышленные роботы: роботизированные сварочные комплексы и сварочные роботы.

Средства индивидуальной и коллективной защиты при проведении сварочных работ.

Пост-обработка, Возобновление и повышение износостойкости изделий и конструкций.

Оборудование и технологии по очистке воздуха, системы вентиляции.

Промышленный Форум «Территория NDT»

**24—26 ОКТЯБРЯ 2022
МОСКВА — ЦВК ЭКСПОЦЕНТР**

Международный промышленный Форум «ТЕРРИТОРИЯ NDT» является ведущей в России и СНГ отраслевой площадкой для продуктивного диалога заинтересованных сторон и демонстрации новейших достижений и разработок в области неразрушающего контроля, технической диагностики, мониторинга состояния и оценки ресурса.

Выставка оборудования и технологий объединяет более 60 компаний — разработчиков и поставщиков российских и зарубежных брендов, сервисные учебные и сертификационные центры, ВУЗы, НИИ, специализированные издания. В рамках делового блока Форума рассматриваются вопросы практического применения технологий контроля и диагностики в различных отраслях промышленности и ВПК.

С 2020 года **ФОРУМ «ТЕРРИТОРИЯ NDT»** проходит в рамках **РОССИЙСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ НЕДЕЛИ (РПН)**, которая объединяет ключевые российские отраслевые промышленные выставки неразрушающего контроля и диагностики, сварочных процессов и оборудования, технологий обработки конструкционных материалов, испытательного и измерительного оборудования, систем автоматизации и интеграции.

Синергия тематик, экспозиций и деловых программ существенно увеличивает возможности получения новых знаний, расширения круга потенциальных заказчиков и полезных контактов для всех сторон Российской промышленной недели. Участники Форума Территория NDT получают дополнительные возможности расширить клиентскую базу за счет притока новых посетителей, посетить несколько крупнейших отраслевых мероприятий, принять участие в разнообразных деловых программах и конференциях, наладить новые партнерские связи в смежных областях.

Мероприятие объединит более **29 000 специалистов**, на выставочной площади свыше **28 000 тыс кв. м** будут представлены более **500 компаний-участников**.



Уважаемые коллеги!

ПРИГЛАШАЕМ ВАС ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ И ВЫСТУПИТЬ С ДОКЛАДОМ на
XXIV Петербургской научно-технической конференции

**«Инновационные средства и технологии УЗ контроля и диагностики»
УЗДМ-2022**

(24 – 27 мая 2022 г., Санкт-Петербург)

ОРГАНИЗАТОРЫ УЗДМ-2022

- Научно-исследовательский институт мостов и дефектоскопии
- Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

- Секции «Физические неразрушающие методы контроля» научного совета по физике конденсированных сред Российской академии наук
- Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике
- Национального Агентства Контроля Сварки
- Объединения производителей железнодорожной техники

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ ВЗНОС

(без учета НДС) :

для участников – 29 000 руб.
для аспирантов – 12 000 руб.
для сопровождающих (без участия в работе конференции) – 6000 руб.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ЯЗЫК КОНФЕРЕНЦИИ

русский

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ ОРГКОМИТЕТА

E-mail: uzdm2022@yandex.ru

телефон: +7 921 9384313

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

1. Новые принципы и технические решения электроакустических преобразователей, характеристики поля, примеры применения
2. Высокоинформативные автоматизированные средства ультразвукового контроля. Структура, алгоритмы обработки сигналов, новые технологические возможности
3. Технологии и опыт применения инновационных средств ультразвукового контроля металлов, перспективных материалов и соединений
4. Ультразвуковой контроль в задачах диагностики
5. Стандартизация и метрологическое обеспечение ультразвукового контроля
Терминология ультразвукового контроля (круглый стол)
6. Обучение, подтверждение квалификации, аттестация и сертификация персонала

ФОРМЫ РАБОТЫ:

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

ВАЖНЫЕ ДАТЫ

- прием заявок **до 15.02.2022 г.**
- прием тезисов докладов **до 01.04.2022 г.**
- рассылка пригласительных билетов и программ **до 05.05.2022 г.**

Для оперативного и надежного информирования о ходе подготовки **УЗДМ-2022** просим Вас, подтвердить Ваш интерес, производя электронную регистрацию на страничке **УЗДМ-2022** на сайте: www.ndt.sp.ru

С уважением и надеждой на Ваше участие в **УЗДМ-2022**

Оргкомитет УЗДМ-2022

VI Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest-2021.



27-30 сентября 2021 г.

Программа

1) Секции конференции:

1. Современные системы и технологии в неразрушающем контроле

- Техническая диагностика
- Промышленная безопасность, в том числе безопасность водородных технологий
- Неразрушающий контроль
- Цифровые технологии в неразрушающем контроле

2. Материаловедение и электронные технологии

- Материалы для контроля неразрушающими методами
- Электронное приборостроение
- Теория, методы и средства измерений и обработки измерительной информации
- Сварка и родственные технологии

3. Методы и средства диагностики в медицине

- Средства измерений, контроля и диагностики в медицине
- Компьютерные медицинские комплексы для функциональной диагностики
- Математическое моделирование в медицине, обработка сигналов и изображений
- Системы автоматизированного сбора и обработки данных о состоянии здоровья человека

2) Выездное заседание производителей оборудования НК и ТД РФ под эгидой РОНКТД

Важные даты:

**1 июля
2021 года**

окончание приема заявок и тезисов на сайте конференции ndts.tpu.ru/sibtest2021

**27-30 сентября
2021 года**

работа секций конференции и выездное заседание производителей оборудования НК и ТД РФ под эгидой РОНКТД

Организационный взнос:

5000 руб.
участники

1500 руб.
стендовые доклады

3000 руб.
студенты, аспиранты



Публикации:

По итогам конференции планируются к опубликованию:

сборник тезисов докладов с последующим размещением в национальной библиографической базе данных научного цитирования РИНЦ.

сборник статей на английском языке, индексируемый в БД Scopus/ Web of Science (оплачивается отдельно). Статус статей в сборнике – book chapter.

Организаторы конференции:



Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике



ООО «ИнТех»

Информационный партнер:



Контакты:

Сайт конференции: ndts.tpu.ru/sibtest2021

E-mail: sibtest@list.ru

+7 923 412 69 22; +7 3822 701 777, доп. 2765 (Аникеева Наталья Евгеньевна)

+7 913 826 03 01 (Юрченко Алексей Васильевич)

+7 (3822) 705 701; +7 913 852 55 52 (Болотина Ирина Олеговна)

Уважаемые участники конференции!

В связи с текущей эпидемиологической обстановкой, обусловленной продолжающимся распространением коронавирусной инфекции на территории города Томска, и решением губернатора Томской области о продлении действия мер по обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия населения, оргкомитет VI Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest-2021 принял решение перенести конференцию на летний период 2022 года. Все присланные ранее тезисы и заявки на участие сохраняются. О месте и времени проведения конференции SibTest-2021 будет сообщено дополнительно.

С уважением, Организационный комитет конференции SibTest-2021