

ВЫЯВЛЯЕМОСТЬ ДЕФЕКТОВ МУФТ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ МАГНИТНЫМИ, ВИХРЕТОКОВЫМ И УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МНОГОКРАТНО-ТЕНЕВЫМ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ

© 2022 г. О.В. Муравьева^{1,2,*}, В.В. Муравьев^{1,2}, М.А. Синцов¹, Л.В. Волкова¹

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

²Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
Россия 426067 Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

*E-mail: pmkk@istu.ru

Поступила в редакцию 24.02.2022; после доработки 07.03.2022

Принята к публикации 11.03.2022

Представлен анализ выявляемости дефектов в муфтах насосно-компрессорных труб различными методами неразрушающего контроля. Используются методы вихретокового, магнитнопорошкового, феррозондового и ультразвукового контроля. Для уменьшения влияния качества акустического контакта на результаты контроля возбуждение и прием рэлеевских волн в многократно-теневом методе обеспечен электромагнитно-акустическим способом. Введен показатель выявляемости дефекта данного типа, определяемый соотношением величины информативного параметра, измеренного на образце с дефектом, и величины аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец. Обоснованы информативные параметры акустического метода: «дисперсия», «многократный коэффициент выявляемости», скорость распространения рэлеевских волн. Акустический метод обеспечивает контроль всей муфты за счет однократной установки преобразователя в отличие от вихретокового, магнитнопорошкового и феррозондовых методов контроля.

Ключевые слова: ультразвуковой многократно-теневой метод, рэлеевская волна, вихретоковый, магнитный контроль, муфты насосно-компрессорных труб.

DOI: 10.31857/S0130308222040029, EDN: BLAXOЕ

ВВЕДЕНИЕ

Важной характеристикой любого метода неразрушающего контроля является его чувствительность или возможность выявления наименьшего по размерам дефекта. Чувствительность методов неразрушающего контроля и выявляемость одного того же типа дефекта различна и зависит от особенностей метода неразрушающего контроля, условий проведения контроля, характеристик объекта контроля.

Так, выявляемость дефектов при визуальном и измерительном контроле ограничивается условиями контроля (освещенность, оптический контраст и др.), а также субъективными факторами (острота зрения, усталость, опыт работы специалиста, выполняющего контроль).

На выявляемость дефектов при магнитном контроле оказывают влияние основные параметры технологии контроля: схема намагничивания, способ контроля, вид тока намагничивания, значения напряженности поля, тип используемых индикаторов и др., а также магнитные свойства материала, шероховатость поверхности, форма и габаритные размеры объекта контроля, наличие покрытий, глубина и раскрытие трещины. Удовлетворительная чувствительность для выявления одних дефектов может быть совершенно непригодной для выявления дефектов другого характера.

Выявляемость дефекта при вихретоковом контроле зависит от глубины и ориентации плоскости дефекта относительно поверхности и в меньшей степени от ширины раскрытия усталостных трещин. Следует отметить возможность ложных срабатываний вихретокового дефектоскопа при наличии зон структурной неоднородности, приводящих к изменению электропроводности, локальных магнитных полюсов (неоднородность магнитных свойств). Максимальная чувствительность вихретокового вида контроля может быть достигнута при контроле деталей с шероховатостью поверхности не более Rz 20.

Фактором, ограничивающим выявляемость дефектов акустическим методом, является состояние и шероховатость поверхности объекта контроля, а также глубина и раскрытие трещины.

Таким образом, при выборе методов неразрушающего контроля конкретных элементов конструкций необходимо учитывать следующие основные факторы: характер (вид) возможных дефектов и их расположение; возможности методов контроля; формы и размеры контролируемых элементов конструкций; материалы, из которых изготовлены контролируемые элементы; состояние и шероховатость контролируемых поверхностей конструкций.

Вопросам изучения сравнительной выявляемости дефектов методом рассеяния магнитного потока и акустическим методом в рельсовой дефектоскопии посвящены работы [1, 2]. В работе [3] исследованы вопросы сравнительной выявляемости локальных повреждений троса (обрыв проволоки) методами методом контроля рассеяния магнитного потока и с использованием датчика Холла в условиях мешающих факторов скорости сканирования датчика и вибраций троса. В работе [4] выявляемость дефектов и достоверность контроля предложено оценивать функцией PoD, описывающей зависимость вероятности обнаружения дефектов от их высоты, что дает дополнительную информацию для оптимизации методик УЗ контроля. Оценка предельной выявляемости плоскостных несплошностей толстолистового проката методами отражения (эхометод) и методами прохождения представлена в работе [5].

Элементы нефтедобывающего оборудования (насосно-компрессорные трубы и соединительные муфты) относятся к опасным производственным объектам, эксплуатируемым в агрессивных средах и при высоких уровнях нагрузок. Технология изготовления трубных заготовок предусматривает получение их методом непрерывного литья, проката или прессования с последующим сверлением. На различных этапах производственных процессов при изготовлении труб могут возникать различные типы дефектов. Одним из наиболее частых дефектов при производстве труб и муфт являются трещины напряжений, обусловленные нарушением режимов термической обработки (после закалки с последующей нормализацией или отпуском).

Трубные заготовки и насосно-компрессорные трубы, как правило, подвергаются входному, операционному и приемочному НК, основными видами которого являются вихретоковый и магнитный методы, реализуемые с использованием специализированных автоматизированных установок контроля и позволяющие выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты [6—9]. Последние неприменимы для коротких деталей (муфт насосно-компрессорных труб).

В последнее десятилетие популярными на рынке услуг НК стали волноводные методы [10], позволяющие осуществлять экспресс-диагностику прутков и труб при существенном увеличении производительности контроля за счет отсутствия сканирования и при локальном доступе к объекту.

В литературе широко освещаются вопросы использования рэлеевских волн для выявления поверхностных и приповерхностных дефектов, в том числе труб, эхометодом контроля [11—25]. С целью отстройки возбуждения—приема рэлеевских волн от качества акустического контакта в ряде исследований предлагается использование электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей [26—29]. В работах [30, 31] показана возможность реализации электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле цилиндрических объектов малых диаметров (прутки, заготовок для производства бурильных труб) для выявления поверхностных дефектов и оценке структурного состояния.

Цель данной работы — анализ выявляемости естественных трещин муфт насосно-компрессорных труб электромагнитно-акустическим методом многократной тени с использованием рэлеевских волн в сравнении с магнитными и вихретоковыми методами контроля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сравнительный анализ выявляемости дефектов различными методами НК проведен на четырех образцах муфт для гладких насосно-компрессорных труб (НКТ согласно ГОСТ Р 53366—2009) с условным диаметром 73 мм, толщиной стенки 5,5 мм из стали 37Г2С. Наружный диаметр муфты составляет 88,9 мм, длина 132 мм, профиль резьбы муфт соответствует ГОСТ 633—80. Муфты подвергнуты термической обработке закалкой и отпуском, в результате нарушения режимов которых на внешней поверхности двух муфт возникли протяженные трещины вдоль всей длины муфты, ориентированные под углом к образующей (образец #3 — под углом 20 град к образующей, образец #4 — под углом 30 град к образующей), две другие муфты (#1 и #2) не имеют видимых дефектов. Для визуального подтверждения дефектов три муфты (#2, #3, #4) были обточены, одна бездефектная (#1) — не подвергалась механической обработке.

При акустических исследованиях использован метод многократной тени, реализованный с использованием экспериментальной установки [32], структурная схема и фото которой представлены на рис. 1. Специализированный накладной ЭМА-преобразователь обеспечивает бесконтактное возбуждение и прием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях. Рабочая частота ЭМА-преобразователя — 1 МГц, что позволяет обнаруживать дефекты на глубине в пределах длины рэлеевской волны (до 3 мм).

Благодаря отсутствию потерь на границе «преобразователь-объект контроля» и достаточно узкой диаграмме направленности ЭМА-преобразователя рэлеевских волн возможно наблюдение

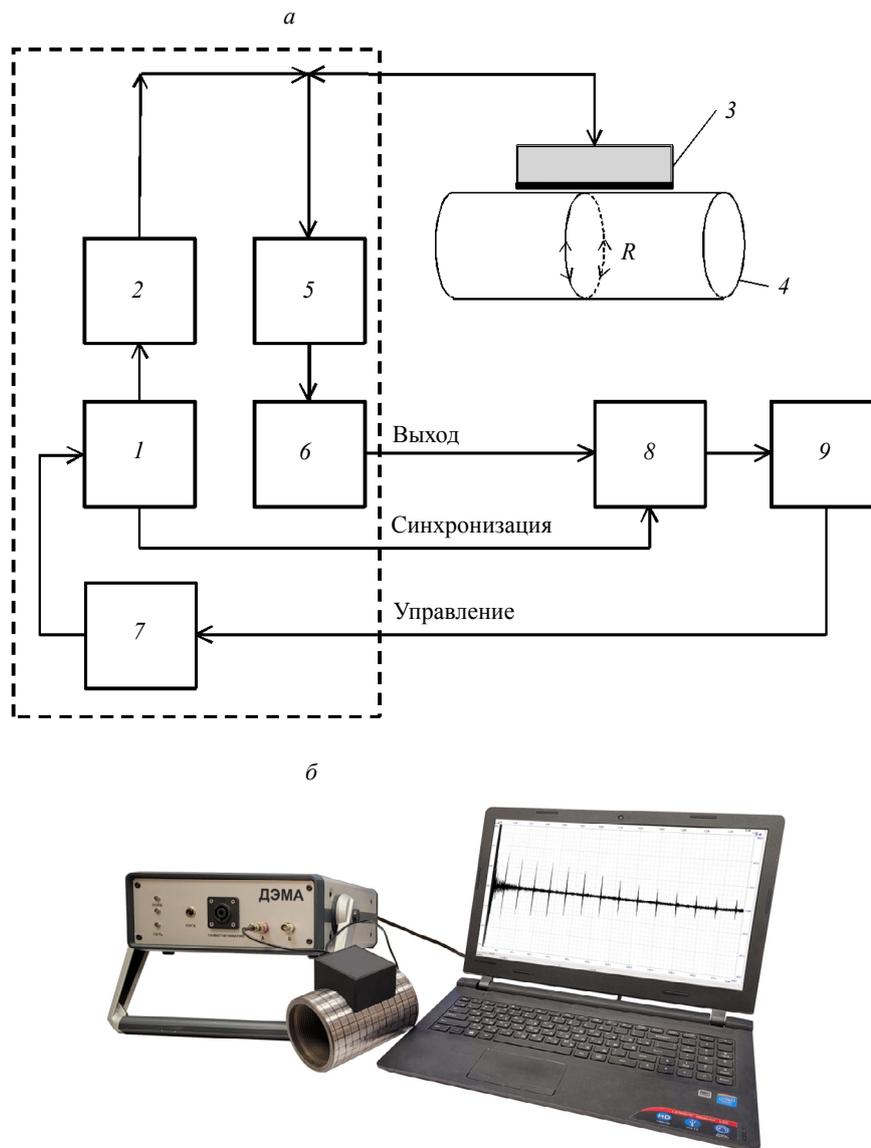


Рис. 1. Структурная схема (а), фото экспериментальной установки (б):

1 — генератор синхрои́мпульсов; 2 — генератор зондирующих импульсов; 3 — накладной двухканальный ЭМА-преобразователь; 4 — исследуемый образец заготовки; 5 — полосовой фильтр; 6 — высокочастотный усилитель; 7 — плата управления генератором синхрои́мпульсов и каналами; 8 — аналого-цифровой преобразователь; 9 — персональный компьютер с программным обеспечением ПРИНЦ.

серии многократных отражений, насчитывающих десятки импульсов. При апертуре ЭМА-преобразователя 50 мм и угле раскрытия основного лепестка диаграммы направленности ± 100 (рис. 2) уже на первом прохождении по периметру объекта вся трещина (по длине образующей муфты) оказывается в поле рэлеевской волны и кратно ослабляет волну на последующих отражениях.

Серия импульсов рэлеевских волн, многократно прошедших в прямом и обратном направлениях по огибающей прутка при отсутствии дефекта и при его наличии, представлены на рис. 3. Серии характеризуются существенным сокращением количества импульсов и их амплитуд для дефектных областей объекта, что объясняется многократными двухсторонними переотражениями от дефекта. Следует отметить, что в процессе распространения рэлеевская волна дополнительно ослабляется за счет расхождения, радиального переизлучения на выпуклой цилиндрической поверхности и рассеяния на шероховатостях поверхности [33].

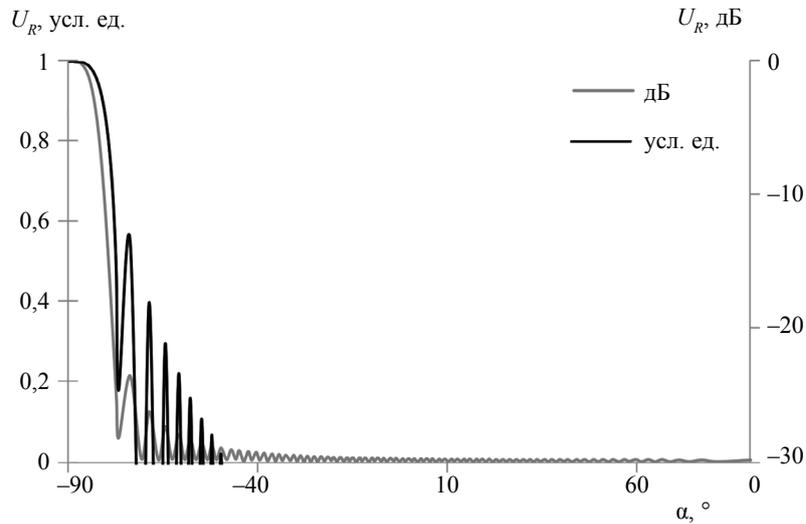


Рис. 2. Диаграмма направленности ЭМА-преобразователя рэлеевских волн.

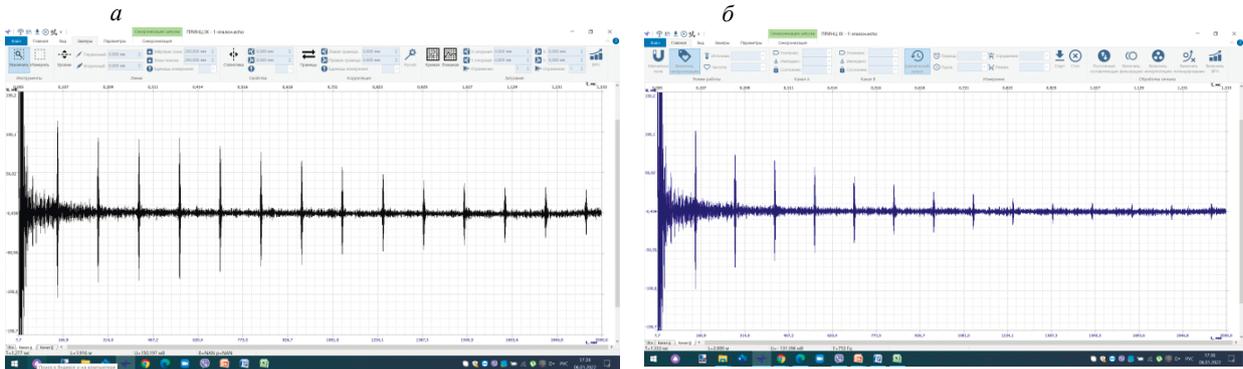


Рис. 3. Эхограммы рэлеевских волн:
 а — образец #2; б — образец #3.

В качестве информативных параметров серии импульсов использованы вероятностные характеристики: математическое ожидание M , дисперсия D , среднеквадратическое отклонение σ , асимметрия S , эксцесс E [34].

Также рассчитывался коэффициент многократного ослабления K_{Nd} (аналог коэффициента выявляемости при ЗТМ), определяемый формулой:

$$K_{Nd} = \sum_{n=1}^N K_{nd} = \sum_{n=1}^N (U_{n0} - U_n) / U_{n0}, \quad (1)$$

где U_{n0} — среднее значение амплитуды импульса при каждом n -ом прохождении для бездефектной образцы муфты; U_n — значение амплитуды импульса при каждом n -ом прохождении для муфты с дефектом.

Вероятностно-статистические характеристики и коэффициент выявляемости рассчитываются в специализированном программном обеспечении ПРИНЦ [32]. Во избежание влияния зондирующего импульса на результаты анализа информативных параметров соответствующий ему интервал времени (от 0 до 89 мкс) удалялся из анализируемого массива. Количество анализируемых импульсов — 13.

Аналізу подлежали сигналы, полученные при установке ЭМА-преобразователя рэлеевских волн по центру образующей образца при изменении угла поворота относительно начальной образующей на 45 град с целью оценки влияния качества акустического контакта на исследуемые

информативные параметры. Рассчитывались средние значения информативных параметров при изменении угла поворота и среднее квадратическое отклонение каждой из характеристик.

Вихретоковый контроль, выполнен с помощью комбинированного дефектоскопа УД2-102ВД. Для возбуждения и приема вихревых токов использован вихретоковый преобразователь ПН-7.5 диаметром 7,5 мм с рабочей частотой 70 кГц. Фазовый режим работы дефектоскопа использован для оценки глубины трещин, при этом в дефектоскопе имеется отстройка от влияния шероховатости поверхности и зазора. Первоначальная настройка чувствительности дефектоскопа для оценки глубины дефекта проведена на СОП-НО-037 из марки стали 45 с шероховатостью Ra 1,25 с искусственным дефектом глубиной ИД-2 0,5 мм. Для дальнейшего уточнения изменения трещины по глубине настройка проводилась на искусственных дефектах ИД-1 глубиной 0,2 мм, ИД-2 — 0,5 мм, ИД-3 — 1 мм, ИД-4 — 2 мм в зависимости от того, к какому значению ближе была глубина трещины при первоначальной настройке. Проведена оценка распределения фазы сигнала в зоне трещины и вне ее с целью определения чувствительности к дефекту.

При реализации магнитного метода контроля использован дефектоскоп ПМД-70 и способ остаточной намагниченности СОН. Циркулярное намагничивание муфт проведено с использованием девяти витков тороидальной обмотки гибкого кабеля тремя импульсами с амплитудой тока в импульсе 1000 А.

Регистрация поля искажения над дефектом проведена феррозондовым методом с использованием градиентометра феррозондового комбинированного прибора Ф-205.30А, а также магнитопорошковым методом с использованием суспензии Диагма 1100 в концентрации 40 г на 1 л воды. С целью оценки абсолютной чувствительности методов магнитного и вихретокового контроля в сравнении с акустическим методом анализировался сигнал не только в зоне дефекта, но и вне его.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вихретоковый метод контроля

Результаты ВТК муфт в виде распределения глубины трещины и фазы сигнала ВТП вдоль траектории трещины представлены на рис. 4 и 5 соответственно. Видно, что глубина трещин в образцах меняется неравномерно и лежит в диапазоне 0,7—2,5 мм для образца #4 и 0,5—1,5 мм для образца #3. Характер изменения фазы сигнала ВТП (рис. 5) близок к характеру изменения глубины трещины.

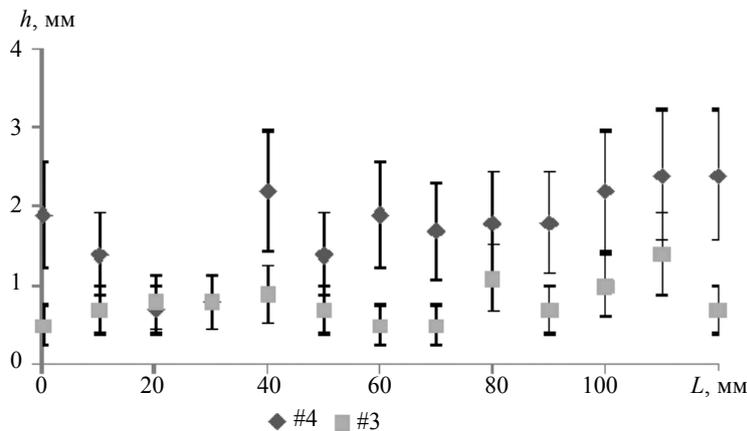


Рис. 4. Распределение глубины трещины вдоль ее траектории относительно проекции на образующую муфты L .

Введем понятие показателя выявляемости дефекта P , определяемого соотношением величины информативного параметра, измеренного на образце с дефектом (#3 и #4), и величины аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец (#2). Чем больше указанное соотношение, тем выше выявляемость метода к дефекту данного типа с использованием данного информативного параметра.

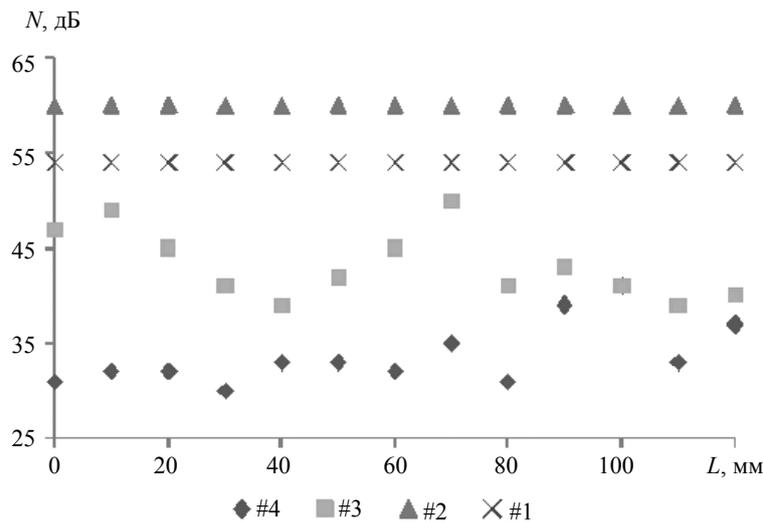


Рис. 5. Распределение фазы сигнала ВТП вдоль траектории трещины относительно проекции на образующую муфты L .

При этом максимальный показатель выявляемости P_{EC} при ВТК для образца #4 составляет 35 дБ, для образца #3 — 47 дБ.

Следует отметить, что отсутствие механической обработки (образец #1) ухудшает на 6 дБ показатели выявляемости дефектов при ВТК.

Магнитный метод контроля

Результаты магнитопорошкового контроля исследованных образцов муфт представлены на рис. 6. Отложения порошка имеют вид индикаций неравномерной толщины. Для образца #4 наблюдается отложение порошка в виде более широкой индикации, что может быть обусловлено большим раскрытием трещины в указанной области, что не противоречит результатам ВТК (большая глубина трещины сопровождается большим раскрытием). Визуализация дефекта в образце #3 несколько хуже ввиду недостаточной чувствительности.

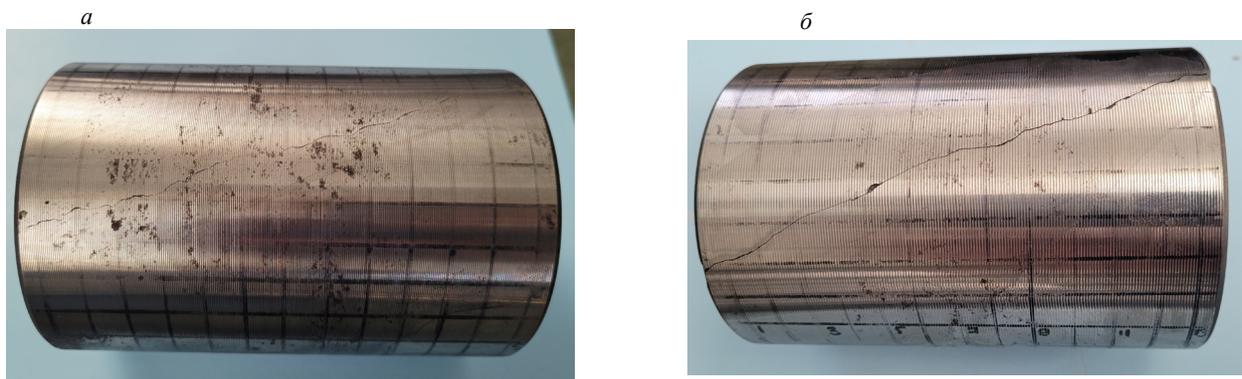


Рис. 6. Отложение магнитного порошка на муфтах #3 (а) и #4 (б).

Феррозондовый контроль осуществлялся вдоль траектории трещины с шагом 10 мм по образующей. Результаты феррозондового контроля в виде зависимости градиента магнитного поля вдоль трещины представлены на рис. 7. Видно, что чувствительность ФЗК к трещине образца #4 существенно превышает чувствительность к трещине образца #3 (значения градиента соизмеримы с уровнем градиента поля для бездефектных образцов).

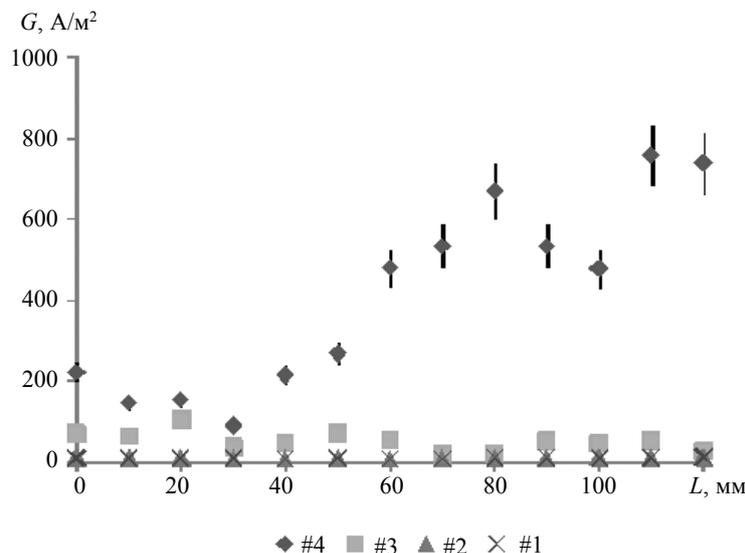


Рис. 7. Распределение градиента магнитного поля G вдоль траектории трещины относительно проекции на образующую муфты L .

Согласно рис. 7, максимальный показатель выявляемости P_{FZ} при ФЗК для образца #4 составляет 35 дБ, для образца #3 — не превышает 15 дБ. Следует отметить, что для образца #1 без механической обработки показатель выявляемости дефекта остается на том же уровне.

Акустический метод

Результаты анализа вероятностных характеристик и коэффициента выявляемости для каждого из исследуемых образцов муфт представлены в табл. 1. Планки погрешностей на гистограммах указывают отклонение от среднего при перемещении ЭМА-преобразователя по углу относительно начальной образующей, т.е. образующей, принятой за начало отсчета.

Таблица 1

Средние значения вероятностных характеристик серии импульсов рэлеевских волн

# Образца	Математическое ожидание M , мВ	Дисперсия D , мВ ²	Среднеквадратическое отклонение σ , мВ	Асимметрия S	Экссесс E
#1	$-0,677 \pm 0,023$	$71,2 \pm 3,6$	$8,31 \pm 0,42$	$0,528 \pm 0,069$	$43,7 \pm 1,9$
#2	$-0,414 \pm 0,008$	$61,8 \pm 4,9$	$7,85 \pm 0,31$	$0,702 \pm 0,073$	$46,5 \pm 1,6$
#3	$-0,379 \pm 0,042$	$35,0 \pm 2,0$	$5,91 \pm 0,16$	$0,858 \pm 0,050$	$71,3 \pm 1,9$
#4	$-0,344 \pm 0,042$	$11,3 \pm 0,6$	$3,36 \pm 0,09$	$0,646 \pm 0,182$	$52,6 \pm 11,1$

Из табл. 1 следует, что параметры «математическое ожидание», «эксцесс» и «асимметрия» не являются информативными с точки зрения дефектности образца. При этом, согласно гистограммам рис. 8, для параметра «дисперсия» (или «среднеквадратическое отклонение») имеет место уменьшение значений с ростом дефектности образца. Параметр «коэффициент выявляемости» напротив имеет тенденцию к увеличению для образцов с дефектами #3 и #4.

Возможность выявления дефекта определяется различиями в величине информативного параметра, измеренного на образце с дефектом (#3 и #4), и величине аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец (#2). В случае параметра «коэффициент выявляемости» бездефектный образец характеризуется величиной отклонения при изменении положения ЭМА-преобразователя по углу относительно начальной образующей.

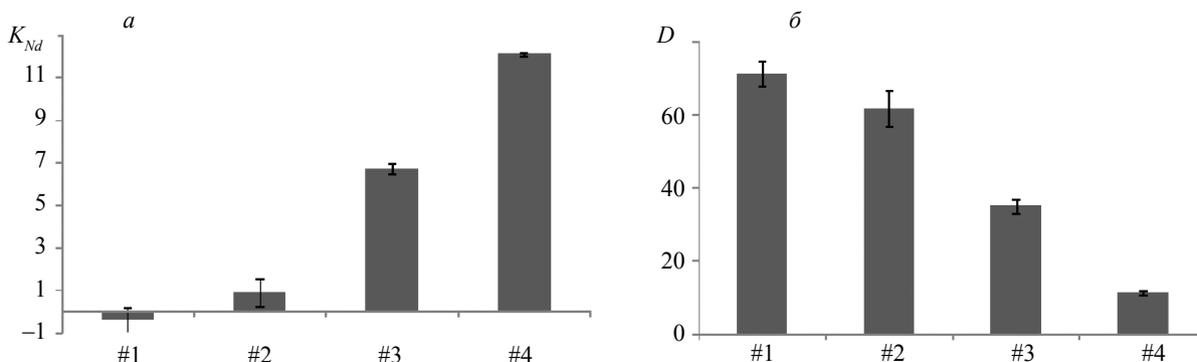


Рис. 8. Параметр «коэффициент выявляемости» (а) и параметр «дисперсия» (б) для исследуемых образцов муфт.

Таблица 2

Значения показателя выявляемости P_A при УЗК для различных информативных параметров

Информативный параметр	Коэффициент выявляемости		Дисперсия	
	Относительно образца #2	Относительно образца #1	Относительно образца #2	Относительно образца #1
P_A (образец #3), раз/дБ	10,6 / 20	11,2 / 21	1,8 / 5	2,0 / 6
P_A (образец #4), раз/дБ	19,0 / 26	20 / 26	5,4 / 15	6,1 / 16

В табл. 2 представлены рассчитанные значения чувствительности для исследованных информативных параметров акустического метода контроля.

Следует отметить, что отсутствие механической обработки (образец #1) существенно (на 10 дБ) улучшает показатели выявляемости дефектов при акустическом методе с использованием параметра «дисперсия» и практически не влияет на показатель выявляемости при использовании параметра «коэффициент выявляемости» в отличие от анализируемых параметров ВТК и ФЗК.

Дополнительно к анализируемым параметрам определена скорость распространения рэлеевских волн в дефектных и бездефектном образце. Результаты оценки скоростей представлены в табл. 3. С учетом погрешности определения диаметра и овальности муфт, измеренных с использованием цифрового штангенциркуля ШЦЦ-II-250-0,01 ГОСТ 166—89 GRIFF 031172, погрешность определения скорости рэлеевских волн не более 1 м/с.

Таблица 3

Скорость C_R распространения рэлеевских волн в исследуемых образцах

# образца	#2	#3	#4
Скорость C_R , м/с	3011±1	2980±1	2976±1

Видно, что скорость рэлеевских волн падает при наличии дефекта более, чем на 30 м/с и не существенно зависит от глубины залегания дефекта. Последнее не противоречит принципу временного теневого метода и является следствием явления дифракции (огибания) волной Рэлея протяженных дефектов. Следует отметить, что завышенное значение скорости в бездефектном образце (#2), равное 3010 м/с, в сравнении с типовым значением скорости рэлеевских волн в стали 37Г2С ($C_R=3000$ м/с), является следствием увеличения скорости при распространении по цилиндрической поверхности [33].

Сравнительная выявляемость методов УЗК, ВТК и ФЗК может быть представлена в виде зависимости соотношения информативных параметров (градиент поля при ФЗК, фаза сигнала при ВТК, коэффициент выявляемости и дисперсия при УЗК) в области с дефектом и в области без дефекта вдоль траектории трещин (рис. 9).

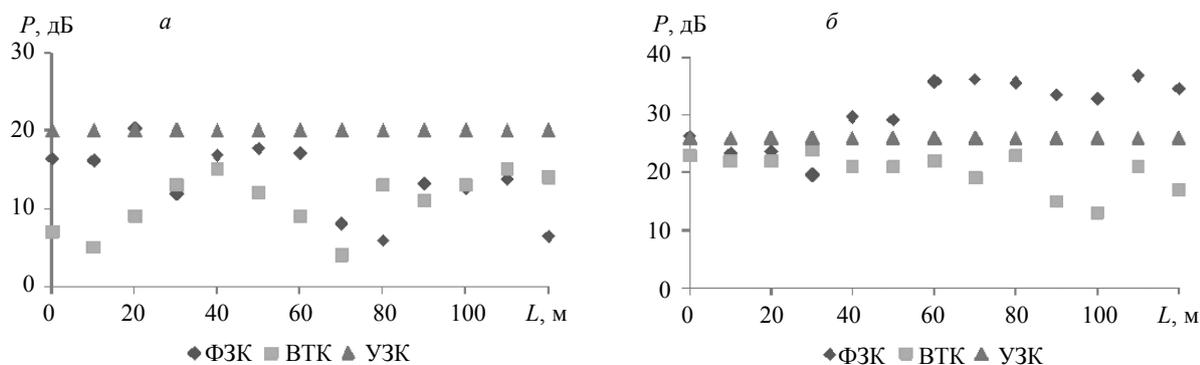


Рис. 9. Сравнительные показатели выявляемости к дефектам информативных параметров методов ВТК, ФЭК и УЗК относительно бездефектной области, выраженные в дБ: образец #3 (а), образец #4 (б).

Согласно рис. 9, для дефекта малого раскрытия и малой глубины (образец #3) наилучшую выявляемость имеет акустический метод, а выявляемость методов ФЭК и ВТК практически одинакова. При этом среднее значение показателя выявляемости при УЗК P_A превышает на 6 дБ значение показателя P_{FZ} при ФЭК и на 9 дБ значение P_{EC} при ВТК (табл. 4).

Так как информативные параметры ультразвукового метода характеризуются усредненными значениями по всей длине трещины, для сравнения в табл. 4 также приведены усредненные вдоль траектории трещины показатели выявляемости для методов ФЭК и ВТК.

Для дефекта с большим раскрытием и большей глубиной (образец #4) выявляемость дефекта с использованием УЗК различными видами НК становится сопоставимой с методами ВТК и ФЭК. При этом наилучшая выявляемость характеризует метод ФЭК, а наихудшая — метод ВТК. Согласно табл. 4, значение показателя P_{FZ} преобладает над значением P_A на 5 дБ и над значением P_{EC} на 11 дБ. Ухудшение выявляемости для более глубоких дефектов при УЗК в сравнении с ВТК и ФЭК обусловлено неравномерным распределением смещений в рэлеевской волне по глубине, когда увеличением глубины трещины не дает дополнительного прироста информативного параметра рэлеевской волны.

Таблица 4

Значения усредненных показателей выявляемости при ФЭК, ВТК и УЗК

# образца	P_{EC}	P_{FZ}	P_A , дБ
#3	11	14	20
#4	20	31	26

ВЫВОДЫ

1. Использование специализированного накладного ЭМА-преобразователя рэлеевских волн позволяет уменьшить влияние качества акустического контакта на результаты контроля, особенно для муфт с горячекатаной поверхностью.

2. Предлагаемый акустический метод многократной тени с использованием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях, в отличие от традиционных методов контроля (ФЭК и ВТК), требующих сканирования всей поверхности, обеспечивает контроль всей муфты за счет однократной установки преобразователя на образующую образца.

3. Введено понятие показателя выявляемости дефекта данного типа, определяемого соотношением величины информативного параметра, измеренного на образце с дефектом и величины аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец. Наибольшую чувствительность к дефектам имеют следующие информативные параметры акустического метода: параметр «дисперсия», имеющий тенденцию к уменьшению, параметр «многократный коэффициент выявляемости», имеющий тенденцию к увеличению, а также скорость распространения рэлеевских волн,

имеющая тенденцию к уменьшению в образцах с дефектами.

4. Сравнительный анализ выявляемости дефектов показал, что для дефекта малого раскрытия и малой глубины (образец #3) акустический метод характеризуется наибольшим значением показателя выявляемости и превышает в среднем на 6 и 9 дБ показатели выявляемости ФЗК и ВТК методов контроля.

5. Отсутствие механической обработки (образец #1) улучшает на 6 дБ показатели выявляемости дефектов при ВТК, ухудшает на 6 дБ показатели выявляемости дефектов при ВТК и не влияет на показатели выявляемости при ФЗК.

6. Предлагаемый метод многократной тени с использованием рэлеевских волн может быть применен для выявления дефектов в поверхностной и подповерхностной зонах с ориентацией близкой к продольной не только в муфтах, но и насосно-компрессорных трубах, толщина которых не менее двукратной длины волны на данной частоте. При этом обеспечивается более высокая производительность за счет сканирования только вдоль образующей трубы.

Исследование выполнено с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антипов А.Г., Марков А.А.* Выявляемость дефектов в рельсах магнитным методом // Дефектоскопия. 2019. № 4. С. 21—29. DOI 10.1134/S0130308219040043 [*Antipov A.G., Markov A.A.* Detectability of Rail Defects by Magnetic Flux Leakage Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 4. P. 277—285. DOI 10.1134/S1061830919040028]

2. *Марков А.А., Максимова Е.А.* Анализ эффективности ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов при контроле рельсов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 2. С. 22—32. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32 [*Markov A.A., Maksimova E.A.* Analysis of the Efficiency of Ultrasonic and Magnetic Channels of Flaw Detection Systems // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2019. V. 22. No. 2. P. 22—32. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32]

3. *Liu S., Sun Y., Jiang X., Kang Y.* Comparison and analysis of multiple signal processing methods in steel wire rope defect detection by hall sensor // Measurement. 2021. V. 171. P. 108768. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108768

4. *Бадалян В.Г.* Выявление и достоверность контроля в ультразвуковой дефектоскопии и дефектометрии // Контроль. Диагностика. 2020. № 7. С. 4—17. DOI 10.14489/td.2020.07.pp.004—017 [*Badalyan V.G.* Identification and reliability of control in ultrasonic flaw detection and defectometry // Kontrol'. Diagnostika. 2020. No. 7. P. 4—17. DOI: 10.14489/td.2020.07.pp.004-017]

5. *Паврос К.С., Сидоренко И.Г., Рокитро Б.* Сравнительная выявляемость плоскостных протяженных дефектов листового проката методами отражения и прохождения // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22. № 6. С. 75—83. DOI 10.32603/1993-8985-2019-22-6-75-83 [*Pavros K.S., Sidorenko I.G., Rokitro B.* Comparative Detectability of Planar Extended Defects of Sheet Metal by Reflection and Transmission Methods // J. Russ. Univ. Radioelectron. 2020. V. 22. No. 6. P. 75—83. DOI: 10.32603/1993-8985-2019-22-6-75-83]

6. *Hu B., Yu R.* Magnetic testing for inter-granular crack defect of tubing coupling // Nondestruct. Test. Eval. 2018. V. 33. No. 2. P. 119—129. DOI: 10.1080/10589759.2017.1341882

7. *Шлеенков А.С., Булычев О.А., Шлеенков С.А., Новгородов Д.В.* Особенности и преимущества применения анизотропных магниторезистивных датчиков поля для дефектоскопии полного объема труб малого и среднего диаметров // Дефектоскопия. 2020. № 5. С. 12—19. DOI 10.31857/S0130308220050024 [*Shleenkov A.S., Bulychev O.A., Shleenkov S.A., Novgorodov D.V.* Features and advantages of applying anisotropic magnetoresistive field sensors to testing the full volume of small- and medium-diameter pipes // Russ. J. Nondestruct. Test. 2020. V. 56. No. 5. P. 417—425. DOI: 10.1134/S1061830920050083]

8. *Wang S., Zhao P., QU Zh., Wang K.* A new system for defects inspection of boiler water wall tubes using a combination of EMAT and MFL // 2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT). IEEE. 2018. P. 65—69. DOI: 10.1109/FENDT.2018.8681967

9. *Крюков А.С., Чегодаев В.В., Жданов А.Г., Лунин В.П.* Метод определения объема произвольно расположенных локальных дефектов при вихретоковом контроле цилиндрических изделий многоэлементным преобразователем // Дефектоскопия. 2015. № 12. С. 46—56. [*Kryukov A.S., Chegodaev V.V., Zhdanov A.G., Lunin V.P.* A method for the determination of the volumes of arbitrarily-spaced local defects during eddy-current testing of cylindrical items by a multi-unit probe // Russ. J. Nondestruct. Test. 2015. V. 51. No. 12. P. 750—758. DOI: 10.1134/S1061830915120050]

10. *Муравьева О.В., Муравьев В.В., Стрижак В.А., Мурашов С.А., Пряхин А.В.* Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2017. 234 с.

11. *Алешин Н.П.* Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэля, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 22—30. DOI: 10.31857/S0130308221050031

[Aleshin N.P. Investigating the detectability of surface volumetric defects in ultrasonic testing with the use of rayleigh waves generated by an electromagnetic-acoustic transducer // Russ. J. Nondestruct. Test. 2021. V. 57. No. 5. P. 361—368. DOI: 10.1134/S1061830921050028]

12. Liu X. Surface crack identification on a cylinder using the signal enhancement of the scanning laser line source method // Appl. Sci. 2018. V. 8. No. 10. P. 1796. DOI: 10.3390/app8101796

13. He C., Deng P., Lu Y., Liu X., Liu Z., Jiao J., Wu B. Estimation of Surface Crack Depth using Rayleigh Waves by Electromagnetic Acoustic Transducers // International Journal of Acoustics and Vibrations. 2017. V. 22 (4). P. 541—548. DOI:10.20855/ijav.2017.22.4501

14. Углов А.Л., Хлыбов А.А., Бычков А.Л., Кувшинов М.О. О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03Н17К10В10МТ // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 4. С. 3—9. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9 [Uglov A.L., Khlybov A.A., Bychkov A.L., Kuvshinov M.O. About non-destructive control of residual stresses in axisymmetric parts made of steel 03Ni17Co10W10MoTi // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2019. V. 22. No. 4. P. 3—9. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9]

15. Cheng L. Crack characterisation using invariable feature extraction in stainless steel specimen used for absorber tubes of CSP applications via EMAT // Renew. Energy. 2017. V. 101. P. 771—781. DOI: 10.1016/j.renene.2016.09.036

16. Kim C. Evaluating rolling contact fatigue damage precursors with Rayleigh waves in 1060 steel // J. Nondestruct. Eval. 2021. V. 40. No. 4. P. 91. DOI:10.1007/s10921-021-00828-z

17. Муравьев В. В., Будрин А.Ю., Синцов М.А. Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 2. С. 37—43. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43 [Murav'ev V.V., Budrin A.Y., Sintsov M.A. Structuroscopy of Heat-Treated Steel Bars by the Speed of Propagation of Rayleigh Waves // Intellekt. Sist. Proizv. 2020. V. 18. No. 2. P. 37—43. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43]

18. Муравьев В.В., Будрин А.Ю., Синцов М.А. Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 4. С. 4—10. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-10 [Murav'ev V.V., Budrin A.Y., Sintsov M.A. Influence of High-Cycle Fatigue on the Speed of Shear and Rayleigh Waves in Steel Bars of Different Heat Treatment // Intellekt. Sist. Proizv. 2020. V. 18. No. 4. P. 4—10. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-10]

19. Волкова Л.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В. Неравномерность акустической анизотропии толстолистового стального проката // Сталь. 2021. № 5. С. 36—41. [Volkova L.V., Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. Nonuniformity of Acoustic Anisotropy of Thick-Sheet Steel // Steel in Translation. 2021. V. 51. No. 5. P. 335—341. DOI: 10.3103/S0967091221050120]

20. Vahquelt A., Syswoio Jo R., Bergander M.J. Electromagnetic acoustic boiler tubes inspection with robotic device // Vibroengineering PROCEDIA. 2017. V. 15. P. 115—118. DOI: 10.21595/vp.2017.19453

21. Zhang Z., Zhao J., Pan Y. Surface circular-arc defects interacted by laser-generated Rayleigh wave // Ultrasonics. 2020. V. 103. P. 106085. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106085

22. Ahmad M. Characterization of surface crack width in plates using Rayleigh wave electromagnetic acoustic transducers // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2021. V. 1043. No. 4. P. 042038. DOI: 10.1088/1757-899X/1043/4/042038

23. Ducouso M., Reverdy F. Real-time imaging of microcracks on metallic surface using total focusing method and plane wave imaging with Rayleigh waves // NDT E Int. 2020. V. 116. P. 102311. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102311

24. Trushkevych O., Edwards R.S. Characterisation of small defects using miniaturised EMAT system // NDT & E International. 2019. V. 107 P. 102140. DOI:10.1016/j.ndteint.2019.102140

25. Thring C.B. The effect of EMAT coil geometry on the Rayleigh wave frequency behaviour // Ultrasonics. 2019. V. 99. P. 105945. DOI: 10.1016/j.ultras.2019.06.007

26. Петров К.В., Соков М.Ю., Муравьева О.В. Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов // Вестник Ижевского государственного технического университета. Т. 21. № 2. 2018. С. 135—146. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146 [Petrov K.V., Sokov M.Y., Muraveva O.V. The Effect of Electromagnetic Acoustic Transducer Design Features on Results of Cylinder Object Testing // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2018. V. 21. No. 2. P. 135. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146]

27. Стрижак В.А., Хасанов Р.Р., Пряхин А.В. Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 159—166. [Strizhak V.A., Hasanov R.R., Pryakhin A. V. Features of Excitation of an Electromagnetic Acoustic Transducer under a Waveguide Method of Testing // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2018. V. 21. No. 2. P. 159—166. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166]

28. Tu J. An external through type RA-EMAT for steel pipe inspection // Sensors Actuators A: Phys. 2021. V. 331. P. 113053. DOI: 10.1016/j.sna.2021.113053

29. Vahquelt A., Karayeva S. D., Bergander M.J. Combination non-destructive test (NDT) method for early damage detection and condition assessment of boiler tubes // Procedia Engineering. 2017. V. 188. P. 125—132. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.465.

30. *Муравьева О.В., Зорин В.А.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн // Дефектоскопия. 2017. № 5. С. 3—9. [*Murav'eva O.V., Zorin V.A.* The multiple shadow method applied to testing cylindrical objects with Rayleigh waves // Russ. J. Nondestruct. Test. 2017. V. 53. No. 5. P. 337—342. DOI: 10.1134/S1061830917050059]

31. *Муравьева О.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В., Синцов М.А., Мышкин Ю.В., Башарова А.Ф.* Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 48—57. DOI: 10.31857/S0130308220120052 [*Muravieva O.V., Volkova L.V., Muraviev V.V., Sintsov M.A., Myshkin Yu.V., Basharova A.F.* Sensitivity of electromagnetic-acoustic multiple shadow method using rayleigh waves in inspection of oil country tubular goods. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 12. P. 995—1004. DOI: 10.1134/S1061830920120050]

32. *Стрижак В.А., Пряхин А.В., Хасанов Р.Р., Ефремов А.Б.* Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 6. С. 565—571 DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571 [*Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Khasanov R.R., Efremov A.B.* Hardware-software complex for rods control by mirror-shadow method using multiple reflections // Journal of instrument engineering. 2017. V. 60. No. 6. P. 565—571. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571]

33. *Викторов И.А.* Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 288 с.

34. *Муравьева О.В., Муравьев В.В., Габбасова М.А., Булдакова И.В., Соков М.Ю.* Анализ отраженных сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом // Автометрия. 2016. Т. 52. № 4. С. 62—70. DOI 10.15372/AUT20160408 [*Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Gabbasova M.A., Buldakova I.V., Sokov M.Y.* Analysis of reflected signals in testing cylindrical specimens by the multiple reflection echo-shadow method // Optoelectron. Instrum. Data Process. 2016. V. 52. No. 4. P. 367—373. DOI: 10.3103/S8756699016040087]