

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

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

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

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

Поступила в редакцию 04.10.2023; после доработки 12.10.2023

Принята к публикации 13.10.2023

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

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

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

A.V. Platunov¹, V.V. Murav'ev^{1,2,*}, O.V. Murav'eva^{1,2}, P.A. Nikitina¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, 426069 Russia

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

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

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

DOI: 10.31857/S0130308223120011, EDN: XIVYLI

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

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

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

ОБЪЕКТЫ КОНТРОЛЯ. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПОДХОДЫ

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

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

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

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

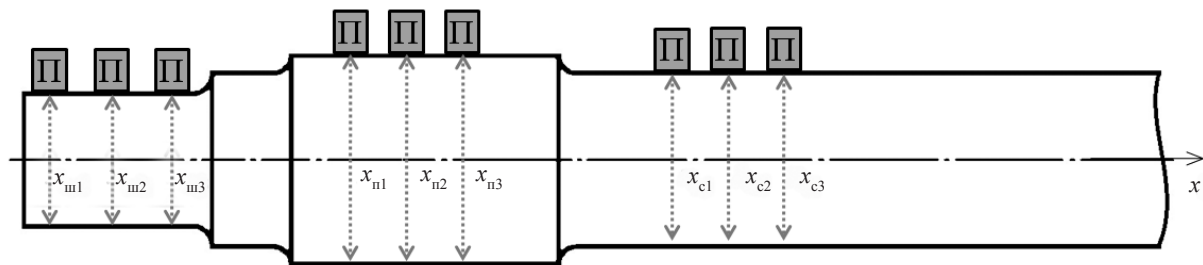


Рис. 1. Контроль оси колесной пары зеркально-теневым методом, преобразователь П устанавливается в случайно выбранных сечениях: $x_{ш1}$ — на шейке; $x_{п1}$ — на подступичной части; $x_{с1}$ — на средней части оси.

В качестве оборудования выбраны ультразвуковые одноканальные дефектоскопы УД2-102ВД с пьезопреобразователем П111-5-6, УД4-Т с ЭМА-преобразователем П411-3-K18 и ЭМА-структуроскоп СЭМА [22] с преобразователем П411-2,5 (рис. 2). Пьезопреобразователь П111-5-6 излучает и принимает продольные волны, ЭМА-преобразователи — поперечные нормально поверхности ввода. Абсолютная погрешность измерения амплитуд сигналов для дефектоскопа УД2-102ВД составляет ± 1 дБ; дефектоскопом УД4-Т составляет $\pm 0,5$ дБ. Для пьезопреобразователя П111-5-6 использовалась контактная жидкость — масло индустриальное И-50А. Измерения шероховатости поверхности проведены профилографом RS100, опорный сигнал получен на образце СО-2 (см. рис. 2).

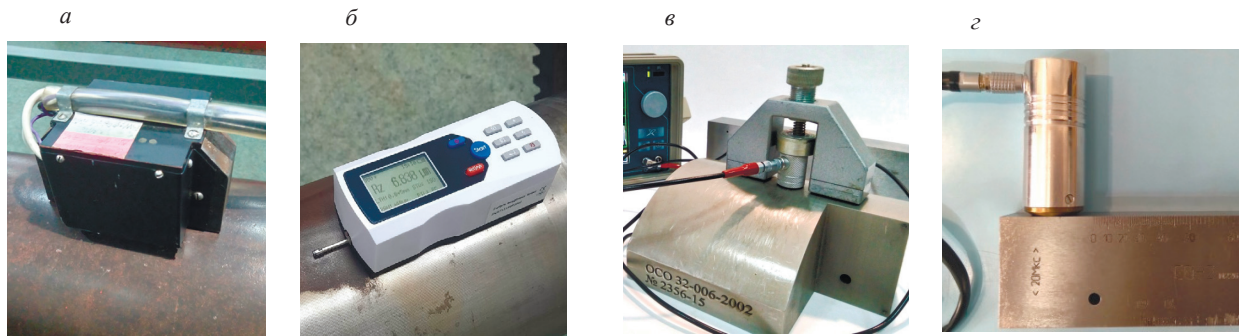


Рис. 2. Используемые средства и объекты контроля: ЭМА-преобразователь П411-2,5 (а) и профилограф (б) на цилиндрической поверхности оси колесной пары; пьезопреобразователь с магнитным фиксатором на образце ОСО 32-006-2002 (в); ЭМА-преобразователь П411-3-K18 на стандартном образце СО-2 (г).

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

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

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

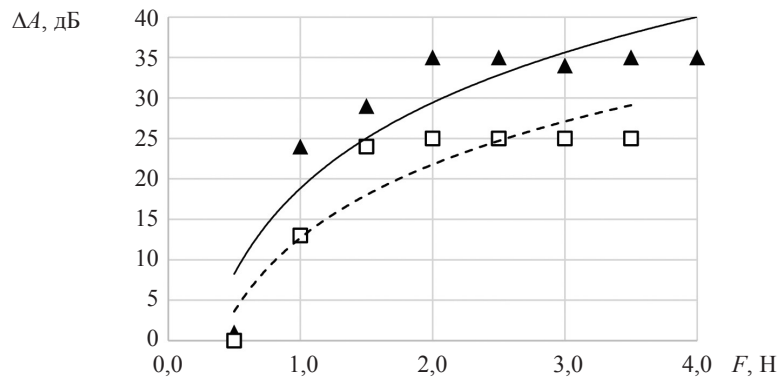


Рис. 3. Относительное изменение амплитуды донного сигнала ($y = 59$ мм) при увеличении силы F прижатия П111-5-6 к поверхностям: плоской (▲) на СО-2; цилиндрической (□) на ОСО 32-006-2002 (радиус кривизны 82,5 мм).

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

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

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

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

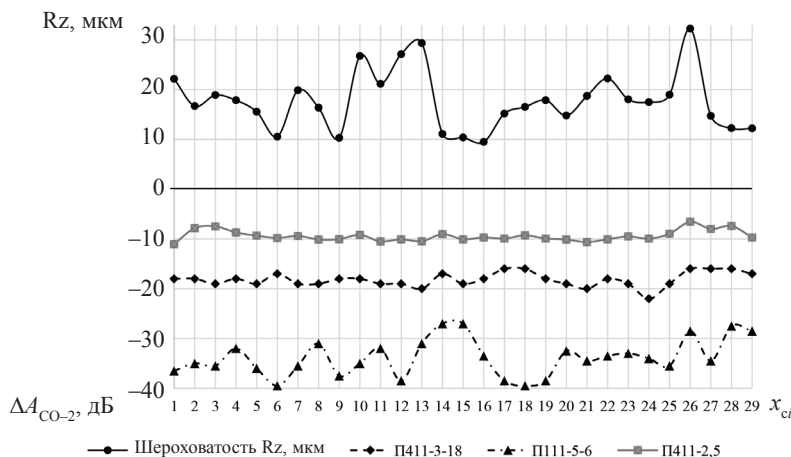


Рис. 4. Параметры шероховатости и падения амплитуд донных сигналов, полученных ЭМА и пьезопреобразователями, относительно СО-2 на сечениях x_{ci} средней части оси №010959.

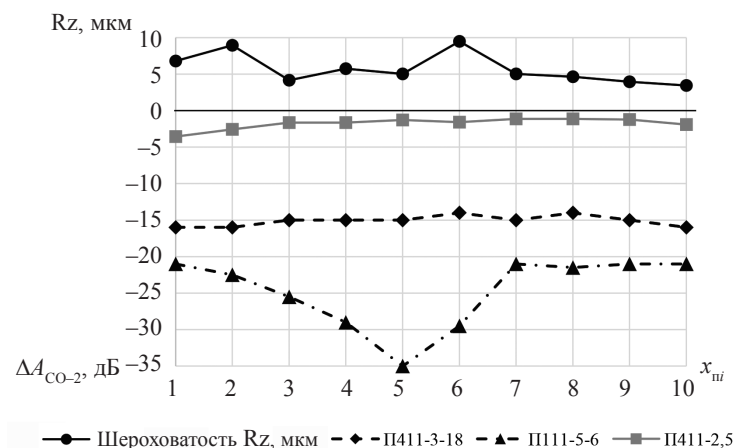


Рис. 5. Параметры шероховатости и падения амплитуд донных сигналов, полученных ЭМА и пьезопреобразователями, относительно СО-2 на сечениях $x_{ш}$ подступичной части оси №559811.

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

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

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

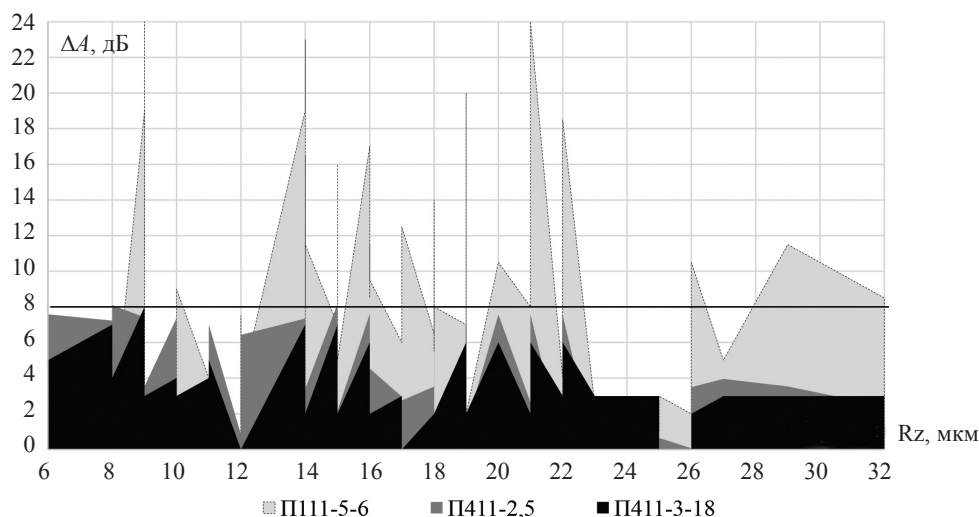


Рис. 6. Разность амплитуд донных сигналов, полученных ЭМА и пьезопреобразователями, на участках средней части старогодных осей в зависимости от шероховатости поверхности.

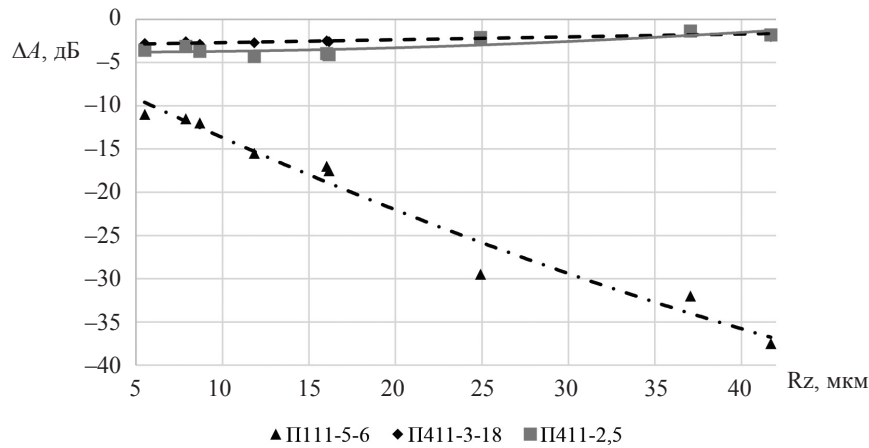


Рис. 7. Зависимость падения амплитуд донных сигналов, полученных ЭМА и пьезопреобразователями, на образце ОСО 32-006-2002 в зависимости от шероховатости поверхности ввода.

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

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

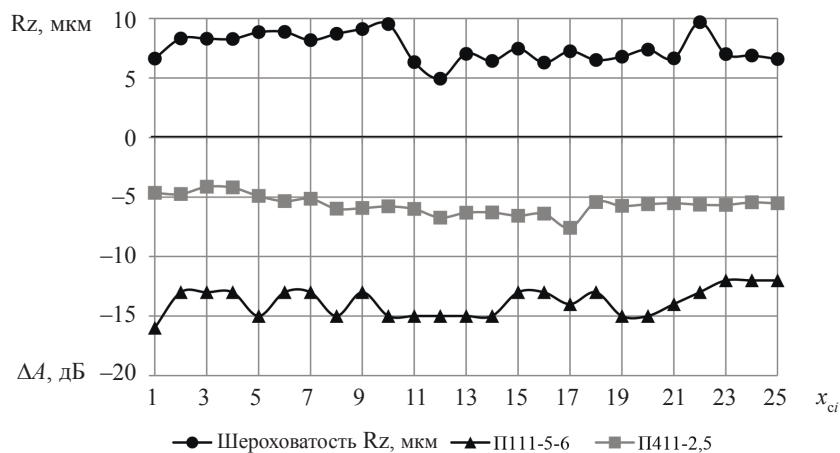


Рис. 8. Параметры шероховатости и падения амплитуд донных сигналов, полученных ЭМА и пьезопреобразователями, относительно СО-2 на сечениях x_{ci} средней части новой оси № 2002116.

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

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

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

Вычислены размеры зерен $D_{\text{зер}}$ стали, при которых амплитуда донного сигнала падает на 6 и 8 дБ, что соответствует браковочному критерию при контроле осей методом TR2 при ремонте и Т2 при приемочном контроле новых осей соответственно. В табл. 1 приведены расчетные значения коэффициентов затухания δ_l и δ_r для продольной и поперечной волн соответственно.

Таблица 1

Расчетные значения размера зерна и коэффициентов затухания

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

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

Таблица 2

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

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

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

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

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

ВЫВОДЫ

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

16. Дымкин Г.Я., Шелухин А.А., Анисимов В.Н. Совершенствование методики эхоимпульсного ультразвукового контроля рельсов при производстве // Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 14—23. DOI 10.1134/S0130308219080025
17. Murav'eva O.V., Brester A.F., Murav'ev V.V. Comparative Sensitivity of Informative Parameters of Electromagnetic-Acoustic Mirror-Shadow Multiple Reflections Method during Bar Stock Testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 8. P. 689—704. [Муравьева О.В., Брестер А.Ф., Муравьев В.В. Сравнительная чувствительность информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката // Дефектоскопия. 2022. № 8. С. 36—51. DOI: 10.31857/S0130308222080048]
18. Петров К.В., Муравьева О.В., Мышкин Ю.В., Башарова А.Ф. Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов // Дефектоскопия. 2019. № 2. С. 16—24. DOI: 10.1134/S0130308219020027
19. Муравьева О.В., Петров К.В. Акустическое поле, формируемое в условиях импульсного излучения—приема на поверхности эллиптического цилиндра // Акустический журнал. 2019. Т. 65. № 1. С. 110—119. DOI: 10.1134/S0320791919010064
20. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Петров К.В. Неразрушающий контроль цилиндрических изделий с использованием проходных электромагнитно-акустических преобразователей / Монография. Ижевск: Изд-во Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2022. 220 с.
21. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Vladykin A.L. Acoustic and Electromagnetic Properties of Maraging Iron–Chromium–Nickel Alloy with Addition of Copper in Mechanical Tension // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023. V. 59. No. 5. P. 515—523. [Муравьев В.В., Муравьева О.В., Владыкин А.Л. Акустические и электромагнитные свойства мартенситно-стареющего железоникельхромового сплава с добавлением меди при механическом растяжении // Дефектоскопия. 2023. № 5. С. 12—20. DOI: 10.31857/S0130308223050020]
22. Муравьев В.В., Стрижак В.А., Пряхин А.В. Исследование внутренних напряжений в металлоконструкциях методом акустоупругости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 12. С. 52—57.
23. Дымкин Г.Я., Лохов В.П. Еще раз о влиянии шероховатости поверхности изделия на результаты УЗК прямыми ПЭП // В мире неразрушающего контроля. 2007. № 1 (35). С. 25—26.
24. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Богдан О.П., Платунов А.В. Ультразвуковой контроль. Физические основы / Учеб. пособие для студ. вузов и профессиональной подготовки специалистов в области неразрушающего контроля. Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022. 128 с.