

Повышение эффективности ультразвукового контроля ободьев цельнокатанных колес при ремонте колесных пар вагонов



Александр ОТОКА



Олег ХОЛОДИЛОВ

Александр Генрикович Отока¹,
Олег Викторович Холодилов²

^{1,2} Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь.

¹ Гомельское вагонное депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», Гомель, Республика Беларусь.

¹ ORCID 0009-0003-9926-9439; РИНЦ SPIN-код: 2466-5708; РИНЦ Author ID 1220168.

² ORCID 0009-0005-5799-0097; РИНЦ SPIN-код: 1818-4103; РИНЦ Author ID 188646.

✉ ¹ otokaa@mail.ru.

✉ ² olhol@tut.by.

АННОТАЦИЯ

Повышение эффективности ультразвукового контроля на железнодорожном транспорте возможно за счет совершенствования и изменения существующей технологии. Одной из основных задач повышения эффективности является улучшение достоверности и информативности ультразвукового контроля ободьев колес при ремонте колесных пар.

Контактный способ ввода ультразвука для ободьев колес по-прежнему является преобладающим на предприятиях вагонного и локомотивного хозяйства железных дорог.

В статье освещаются технические приемы ультразвуковой дефектоскопии обода цельнокатанных колес при ремонте колесных пар вагонов в соответствии с существующими

нормативными техническими документами. Описаны проблемы выявления дефектов пьезоэлектрическими преобразователями с углами ввода 0°, 40°, 50° при контроле обода с боковой внутренней поверхности и 90° – со стороны поверхности катания.

Предложен вариант новой методики контроля обода колеса со стороны поверхности катания с использованием пьезоэлектрических преобразователей с углами ввода 65°–74°. Проведен сравнительный анализ по выявлению одновременно восьми отражателей в настроечном образце с использованием преобразователей 2,5P65°69°74°, П121–2,5–70° РДМ и П121–0,4–90°.

Ключевые слова: цельнокатанные колеса, Рэлеевские волны, ультразвуковой контроль, поверхность катания, обод колеса, повышение эффективности.

Для цитирования: Отока А. Г., Холодилов О. В. Повышение эффективности ультразвукового контроля ободьев цельнокатанных колес при ремонте колесных пар вагонов // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-8>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня ультразвуковой контроль на железнодорожном транспорте занимает особое место в силу необходимости обеспечения безопасности перевозки грузов и пассажиров. Он является основой выявления внутренних дефектов, раскрытых по глубине поверхностных трещин в различных частях осей колесных пар, а также в ободьях и дисках цельнокатанных колес¹.

Для контроля ободьев цельнокатанных колес на наличие дефектов используют в качестве основного ввод ультразвука (УЗ) с внутренней грани колеса с углами ввода пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) 0° , 40° , 50° . Однако на практике при вводе УЗ с внутренней грани имеет место «мертвая» зона, в которой возможно возникновение дефекта. К примеру, нормируемая «мертвая» зона у ПЭП для углов ввода 40° , 50° составляет ≈ 6 мм, а для угла ввода 0° – $10...15$ мм. При этом контактный способ ввода УЗ может не обеспечить требуемую чувствительность метода в местах задиров и сколов, которые могут быть на внутренней грани колеса [1]. Толщина обода колес также влияет на выявление дефектов в случае с фиксированным положением ПЭП в составе устройства сканирования колеса УСК-5А. В нормативной технической документации основное внимание обращается на выявление отражателей определенных размеров в различных частях колеса, но не учитывается тот факт, что дефекты могут располагаться под различными углами по отношению к ПЭП и находиться в других зонах. Естественные дефекты (поры, трещины, расслоения и др.) отличаются от искусственных отражателей (отверстие, засверловка, пропилен и др.) аномальностью формы. Например, внутри дефектов могут быть оксиды и различные вещества, которые при УЗ-контроле способствуют, как правило, уменьшению амплитуды отраженного сигнала. Объемные дефекты типа пор, шлаковых включений различного вида дают рассеяние падающей волны, практически одинаковое по всем направлениям. Однако для плоскостных дефектов (трещина, расслоение и др.) рассеяние имеет очевидную направленность.

¹ ПР НК В.2. Правила неразрушающего контроля деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Специальные требования. – М.: АО «Кодекс». – 2013. – 88 с.

Направление плоскости таких дефектов по отношению к плоскости, в которой распространяется УЗ-волна, может кардинально отличаться и напрямую зависит от технологии изготовления, условий и режимов дальнейшей эксплуатации колес. Представляют интерес для выявления трещины, выходящие из одной точки или имеющие паукообразный вид.

От плоскостных дефектов эхо-сигналы большой амплитуды наблюдают только при благоприятных условиях (зеркальное отражение). При незеркальном отражении появляются дифракционные волны от краев дефекта. Их амплитуда значительно меньше амплитуды при зеркальном отражении и определяется формой дефекта, направлением излучения и приема относительно плоскости дефекта, а также типом излучаемых и принимаемых волн [2–4].

На практике отмечается, что при контроле прямыми ПЭП изделий с неровностями поверхности от механической обработки может происходить возбуждение поверхностной волны Рэлея, которая распространяется перпендикулярно направлениям неровностей [5]. Такой эффект приводит к появлению ложных эхо-сигналов на развертке дефектоскопа и влияет на правильность оценки качества ободьев колес (бандажей). Так, например, при вводе УЗ с боковой внутренней поверхности колеса ложный сигнал может появляться от двугранного угла края обода (бандажа), противоположного гребню.

Необходимо отметить, что при контроле наклонным совмещенным ПЭП амплитуда эхо-сигнала дифракционной волны от края вертикальной полуплоскости при малой площади сечения приблизительно эквивалентна амплитуде отраженного сигнала от бокового цилиндрического отверстия диаметром ≈ 4 мм для продольной волны и 2 мм для поперечной (для расчета $d = \lambda/2\pi$, где λ – длина волны при частоте ПЭП 2,5 МГц).

Наблюдается также рассеяние на неровной поверхности дефекта. Рассеяние тем больше, чем больше параметр Рэлея ($R = 2k\sigma \times \cos \epsilon$, где k – волновое число, σ – среднеквадратическое значение высоты неровностей, ϵ – угол падения волны на дефект) [6].

На основании вышеизложенного видно, что существуют технологические ограничения, снижающие эффективность контактного УЗК.

Таблица 1

Варианты методов ввода УЗ с внутренней грани обода колеса¹

✓ DR2.1 (угол ввода 0°) контроль по окружности обода колеса продольными волнами при установке ПЭП ниже уровня поверхности катания ✓ DR2.2 (угол ввода 0°) контроль по окружности обода колеса продольными волнами на расстоянии 30 мм от нижнего края обода (для колес повышенной твердости)	✓ DR3.1 (угол ввода 40°) контроль по окружности обода колеса поперечными волнами при установке ПЭП ниже уровня поверхности катания	✓ DR3.3 (угол ввода 50°) контроль по окружности обода колеса поперечными волнами при установке ПЭП выше уровня поверхности катания
Выявление в основном сечении обода продольных усталостных трещин, разрывающихся преимущественно перпендикулярно поверхности катания, расслоений, неметаллических включений и других внутренних несплошностей	Выявление поперечных усталостных трещин на внешней боковой грани обода в зоне сопряжения с поверхностью катания	Выявление поперечных трещин и внутренних несплошностей в гребне обода

В настоящее время ведется постоянная работа по разработке направлений совершенствования существующих методик УЗ-контроля колесных пар подвижного состава, в том числе и технических средств контроля [7; 8].

Целью работы является совершенствование УЗ-контроля ободьев цельнокатаных колес на наличие разноориентированных трещиноподобных дефектов.

**ОБЪЕКТЫ КОНТРОЛЯ.
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПОДХОДЫ**

В соответствии с нормативным документом¹ УЗ-контроль цельнокатаных колес выполняют эхо-импульсным методом с целью выявления внутренних и поверхностных дефектов, которые расположены в ободьях и имеют характеристики, превышающие браковочные значения¹.

В табл. 1 показаны обязательные варианты метода контроля цельнокатаного колеса с внутренней боковой поверхности обода.

Одним из способов УЗ-контроля поверхности деталей цилиндрической формы является эхо-метод с использованием Рэлеевских волн. Достоинства этого метода контроля связаны с высокой производительностью за счет установки ПЭП в одну или несколько точек, позволяющих оценить состояние всей поверхности объекта контроля [9]. При этом не требуется сканирование по всей поверхности. Так как поверхностная волна обладает высокой чувствительностью к выявлению поверхностных дефектов, то и требования к состоянию поверхности детали предъявляются высокие.

В железнодорожной отрасли метод получил наиболее широкое применение для конт-

роля цельнокатаных колес и бандажей после обточки на колесотокарном станке. Контроль поверхностными волнами осуществляется в двух направлениях путем переставления ПЭП на расстояние ¼ длины окружности колеса (как правило, не менее одного переставления). Выявлению подлежат различные дефекты на поверхности катания и в приповерхностном слое обода на глубине до 1...2 мм (DR4).

Известно, что по закону Снеллиуса после падения УЗ-луча в призме ПЭП под углом 55–57° в среде преломленная волна существует только в виде поверхностной. Именно такой угол падения луча в призме используется в ПЭП железнодорожного назначения, промаркированного как П121–0,4–90°.

Однако использование данного ПЭП на практике осложнено влиянием на результаты таких факторов, как загрязнения, остатки или избыток контактной жидкости, наличие задиров, оставленных после обточки колеса и др. Следует учитывать, что в процессе работы с таким типом ПЭП достаточно сложно найти дефект по причине его способности принимать волны неосновным «задним» лепестком диаграммы направленности. Также амплитуда эхо-сигнала от дефекта изменяется неравномерно по причине таких явлений, как многократное переотражение волн от границ (фаска обода, галтельный переход к гребню) и дальнейшей их интерференции [10].

Контроль колеса поверхностной волной по варианту метода DR4 (90°) со стороны поверхности катания является недостаточным, так как дефекты могут залегать на разной глубине и не всегда будут выявляться и с внутренней стороны обода поперечной волной наклонным ПЭП по варианту





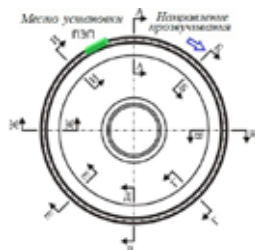
а



б



в



г

Рис. 1. Пример выявления эталонных отражателей в НО [фото авторов].
а – ПЭП П121–0,4–90° (со встроенными магнитами); б – ПЭП 2,5Р65°69°74°;
в – ПЭП П121–2,5–70°РДМ; г – расположение отражателей в НО по секторам.

DR3.1(40°), и продольной волной прямым ПЭП по DR2.1 (0°).

Для проведения экспериментальных исследований был выбран настроечный образец (НО) в виде сформированной колесной пары с восемью искусственными отражателями на цельнокатаном колесе диаметром 903 мм. Ввод УЗ проводился на НО со стороны поверхности катания на расстоянии 70 мм от внутренней грани обода в одной точке колеса с использованием УЗ-дефектоскопа УД2–102ВД и комплекта преобразователей: П121–0,4–90° (РФ), П121–2,5–70° РДМ (РФ), П121–2,5–65° РДМ (РФ), 2,5Р65°69°74° (КНР). В качестве контактной жидкости применялось масло индустриальное И-20. При контроле обода колеса для П121–0,4–90° вызывалась типовая настройка завода-изготовителя (скорость УЗ $c = 2999$ м/с, амплитуда зондирующего импульса высокая, зоны временной селекции $BC1_{нач}$, $BC1_{кон}$, $BC2_{нач}$, $BC2_{кон}$ настраиваются автоматически, частота ПЭП 0,4 МГц, угол ввода 90°), а для всех остальных параметры контроля устанавливались самостоятельно в соответствии с длиной окружности колеса и характеристиками ПЭП ($BC1_{нач} = 133,6R$, $BC1_{кон} = 3000R$, скорость УЗ $c = 3260$ м/с, амплитуда зондирующего импульса высокая, частота ПЭП 2,5 МГц, угол ввода 65°, 69°, 70°, 74°).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представляло интерес изучение особенностей выявления отражателей с поверхности катания колеса при использовании традиционного ПЭП П121–0,4–90° (с помощью поверхностной волны) и наклонных ПЭП с большими углами ввода (с помощью поперечной волны) 2,5Р65°69°74° (трехэлементный ПЭП в одном корпусе), П121–2,5–70° РДМ, П121–2,5–65° РДМ (рис. 1).

Использование таких больших углов 65°–74° при контроле колесных пар в вагонном хозяйстве не предусмотрено. Однако данные ПЭП широко используются в дефектоскопии рельсов как в составе дефектоскопной тележки, так и при ручном подтверждающем контроле (70° – контроль головки рельса со стороны поверхности катания, 65° – контроль зон сварных стыков в области головки со стороны поверхности катания)^{2,3}. Стоит отметить, что такие углы ввода используются при контроле

² СТП БЧ 38.427–2021 Неразрушающий контроль рельсов и сварных стыков. Стандарт организации (утвержден приказом начальника Белорусской железной дороги от 18.06.2021 № 532НЗ). – 2021. – 127 с.

³ СТП БЧ 38.343–2016 Ультразвуковой контроль рельсов в пути дефектоскопом УДС2-РДМ-22. Стандарт организации (утвержден приказом начальника Белорусской железной дороги от 15.07.2016 № 665НЗ). – 2016. – 81 с.

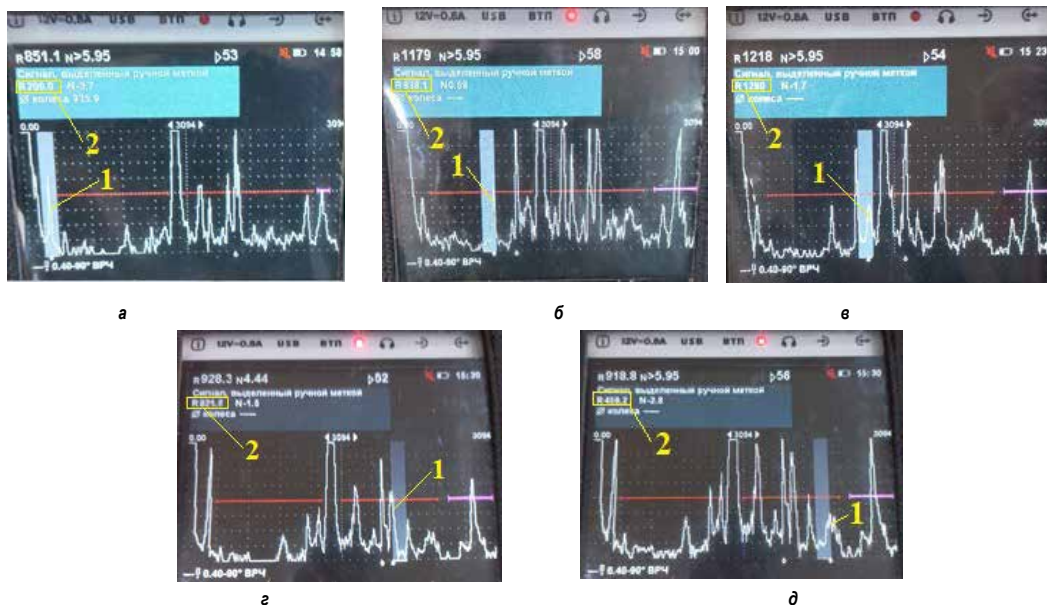


Рис. 2. Дефектограммы выявления отражателей в НО ПЭП П121–0,4–90°:

1 – сигнал от отражателя; 2 – расстояние по лучу до отражателя, мм; а – горизонтальное сверление диаметром 5 мм на глубине 10 мм от поверхности катания колеса (вне зоны контроля временной селекции ВС1); б – вертикальное сверление 5 мм в гребне на расстоянии 17,5 мм от внутренней грани колеса; в – вертикальное сверление 5 мм на поверхности катания на расстоянии 70 мм от внутренней грани колеса; г – выявление пропила на фаске глубиной 3 мм и шириной 1 мм «задним» лепестком; д – выявление засверловки 4 мм глубиной 5 мм на внутренней грани колеса на расстоянии 50 мм от вершины гребня «задним» лепестком [фото авторов].

сварных соединений, что обеспечивает низкий уровень паразитных (ложных) сигналов и высокую выявляемость дефектов, залегающих на разной глубине [11–13].

Контроль поверхности катания ПЭП П121–0,4–90° (рис. 2) показал, что в зоне ВС1 были выявлены отражатели прямым лучом (по расстоянию от передней грани ПЭП) в сечении В–В, Г–Г, а в зоне ВС2 «задним» лепестком (по расстоянию от задней грани ПЭП) – в сечении Е–Е, Ж–Ж. Вне зоны ВС1 был выявлен отражатель прямым лучом (по расстоянию от передней грани ПЭП) в сечении А–А.

Идентифицировать остальные сигналы трудно, а в отдельных случаях не представляется возможным по причинам, описанным выше. При этом, появляющиеся дополнительные сигналы в зоне ВС2 могут дублировать сигналы зоны ВС1, но с пересчетом расстояния искусственно созданной настройки дефектоскопа.

Контроль поверхности катания ПЭП 2,5Р65⁰69⁰74⁰ (рис. 3) показал отличные результаты по выявлению всех отражателей последовательно друг за другом.

Очевидно, такая высокая чувствительность связана с конструкцией ПЭП, когда один пьезоэлемент может испускать УЗ-вол-

ну, а другой (находящийся в наиболее благоприятном месте для приема) ее принимать. Большие углы ввода, частота 2,5 МГц и широкая диаграмма направленности ПЭП способствуют тому, что дефекты, имеющие разные геометрические размеры и форму, могут быть классифицированы по сигналу.

При создании настройки в память дефектоскопа заносился угол 69°, один из трех, указанных в маркировке ПЭП.

Схема прозвучивания колеса представлена на рис. 4.

За счет многократного переотражения УЗ-луча от поверхности катания контроль становится эффективным по всей длине окружности колеса. В зависимости от диаметра колеса и угла ввода ПЭП участок переотражения УЗ-луча по протяженности будет различный и находится в диапазоне 160...260 мм. Можно отметить, что такой контроль со стороны поверхности катания позволит выявлять дефекты не только в приповерхностном слое обода, но и на глубине до 35 мм от поверхности катания. При такой схеме сканирования эффективность выявления дефектов – неметаллических включений, поперечных трещин, раковин, расслоений и других несплошностей – только увеличивается.



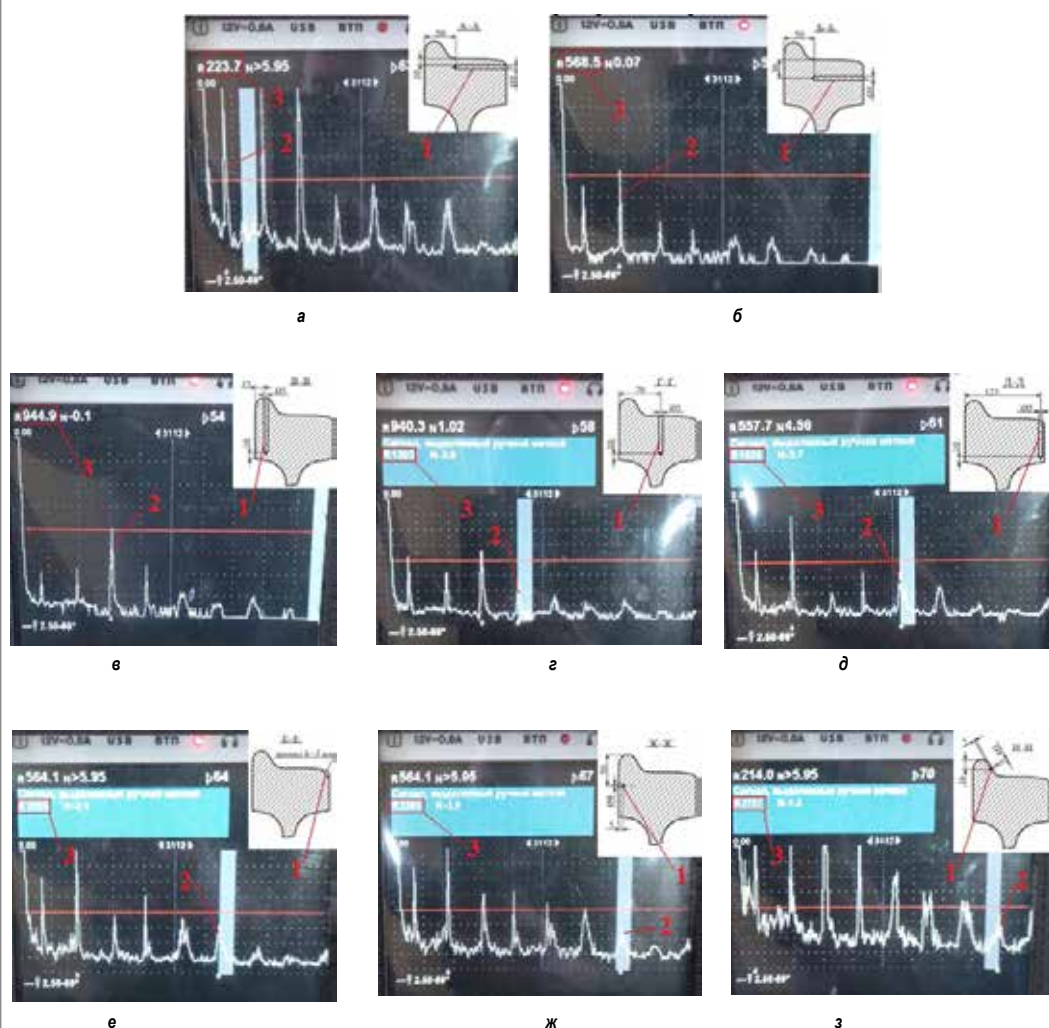


Рис. 3. Дефектограммы выявления отражателей в НО ПЭП 2,5P65°69°74°:
1 – искусственный отражатель; 2 – сигнал от отражателя, мм; 3 – расстояние по лучу до отражателя; а – горизонтальное сверление диаметром 5 мм на глубине 10 мм от поверхности катания колеса; б – горизонтальное сверление 5 мм на глубине 30 мм от поверхности катания колеса; в – вертикальное сверление 5 мм в гребне на расстоянии 17,5 мм от внутренней грани колеса; г – вертикальное сверление 5 мм на поверхности катания на расстоянии 70 мм от внутренней грани колеса; д – вертикальное сверление 5 мм в зоне фаски поверхности катания на расстоянии 125 мм от внутренней грани; е – пропил на фаске глубиной 3 мм и шириной 1 мм; ж – засверловка 4 мм глубиной 5 мм на внутренней грани колеса на расстоянии 50 мм от вершины гребня; з – засверловка 3 мм глубиной 2 мм на расстоянии 16 мм от вершины гребня колеса [фото авторов].

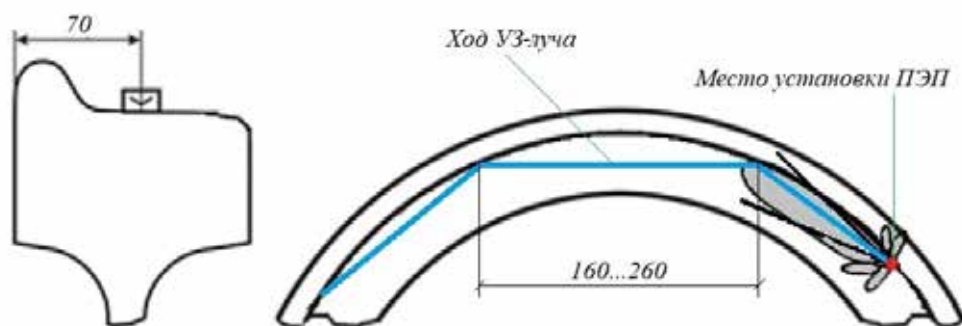


Рис. 4. Схема сканирования и направление прозвучивания [предложена авторами].



а



б

Рис. 5. Дефектограммы годного колеса колесной пары после обточки на колесотокарном станке, полученные ПЭП 2,5Р65°69°74° а – до установки ПЭП; б – после установки ПЭП на поверхность катания [фото авторов].

Сканирование требуется производить в нескольких точках, отклоняя луч ПЭП в обе стороны на 10–15°. При появлении в зоне контроля сигнала необходимо найти такое положение, при котором его амплитуда будет максимальной.

Для подтверждения того, что контроль эффективен и настройка создана правильно, была подобрана колесная пара после обточки колеса на колесотокарном станке с аналогичным диаметром 903 мм. Как видно на рис. 5, ложные индикации отсутствуют.

При использовании ПЭП П121–2,5–70° (рис. 6) также имеет место высокая чувствительность контроля при выявлении всех отражателей.

Однако контроль П121–2,5–70° РДМ из-за его геометрических размеров и малой площади контакта все же уступает по чувствительности трехэлементному ПЭП в части разброса показаний сигналов по амплитуде, так как излучателем и приемником является один пьезоэлемент.

Ультразвуковой контроль обода колеса при такой схеме прозвучивания подразумевает деление колеса на участки (контроль по точкам) или сканирование поверхности катания на расстоянии 300–400 мм в двух направлениях путем перемещения ПЭП посередине поверхности катания, отклоняя луч ПЭП в обе стороны на 10–15° через каждые 5 см пути.

ВЫВОДЫ

Результаты исследований подтвердили высокую чувствительность нового варианта метода контроля со стороны поверхности



Рис. 6. Дефектограмма выявления отражателей в НО ПЭП П121–2,5–70-РДМ:

- 1 – горизонтальное сверление диаметром 5 мм на глубине 10 мм от поверхности катания колеса;
- 2 – горизонтальное сверление 5 мм на глубине 30 мм от поверхности катания колеса;
- 3 – вертикальное сверление 5 мм в гребне на расстоянии 17,5 мм от внутренней грани колеса;
- 4 – вертикальное сверление 5 мм на поверхности катания на расстоянии 70 мм от внутренней грани колеса;
- 5 – вертикальное сверление 5 мм в зоне фаски поверхности катания на расстоянии 125 мм от внутренней грани;
- 6 – пропил на фаске глубиной 3 мм и шириной 1 мм;
- 7 – засверловка 4 мм глубиной 5 мм на внутренней грани колеса на расстоянии 50 мм от вершины гребня;
- 8 – засверловка 3 мм глубиной 2 мм на расстоянии 16 мм от вершины гребня колеса [фото авторов].

катания на расстоянии 70 мм от внутренней боковой поверхности обода.

При установке ПЭП в одну точку и отклонении луча в обе стороны на 10–15° отмечается выявление дефектов на примере искусственных отражателей в НО, различных по своим размерам, ориентации и форме. Высокая производительность такого контроля не снижает достоверность полученных результатов УЗ-дефектоскопии, и, благодаря широкой диаграмме направленности, эффективность выявления дефектов повышается в сравнении с вводом УЗ со стороны внутрен-





ней боковой поверхности обода. В связи с возможным переотражением от приободной зоны и с учетом того, что контроль эффективен на глубине до 35 мм, целесообразно использовать предложенный вариант метода для колес с толщиной обода до 40 мм.

В работах [14; 15] приводится информация, что оценка допустимости несплошностей по эталонным отражателям в НО можно выполнить только со значительной погрешностью, которую вносит разность затухания в колесе (материал Ст. 2, Ст. 2Г, Ст. 1, Ст. Т) и НО. Поэтому применение предложенного варианта контроля с применением ПЭП с углами ввода 65°–74° с поверхности катания колеса предусматривает возможность изменения технологии УЗ ободьев цельнокатаных колес в части использования его как основного метода совместно с комплексом DR3.1 (40°), DR3.3 (50°), DR 2.1 (0°), DR2.2 (0°), DR4 (90°) или как дополнительного (подтверждающего в спорных ситуациях).

Предложенный нами подход к УЗ-дефектоскопии ободьев цельнокатаных колес колесных пар при ремонте позволит повысить эффективность неразрушающего контроля и эксплуатационную надежность подвижного состава на железнодорожном транспорте.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Отока А. Г., Логунов В. Г., Холодилов О. В. Чувствительность контактного и иммерсионного способов ультразвукового контроля при выявлении эталонных отражателей в настроенном образце // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2023. – № 1. – С. 30–36. EDN: GVVYPJ.
- Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В., Филинов В. Н., Аертс В., Бабаджанов Л. С. [и др.] *Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник*. – М.: Изд-во Машиностроение, НИИИИ МНПО «Спектр», 2005. – 656 с. ISBN 5-217-03300-2.
- 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: 10.22213/2413-1172-2019-22-32.
- Ермолов И. Н., Вopilкин А. Х., Бадалян В. Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии. Краткий справочник. – М.: Изд-во ООО НПЦ НК «ЭХО+», 2002. – 109 с. [Электронный ресурс]: <https://djvu.online/file/1nsdfaY0ymWCu?ysclid=m3oa56dhny152857484>. Доступ 16.05.2024.

- Лысак Д. В. Определение ложных эхо-сигналов отражения поверхностной волны при ультразвуковом контроле бандажей колесных пар подвижного состава железных дорог // *Технические науки – от теории к практике*. – 2013. – № 17–1. – С. 131–137. EDN: RMTSHB.

- Кунина П. С., Дубов В. В., Поляков А. В., Терещенко И. А., Новгородский А. А., Степанов М. С. Целесообразность проведения ультразвукового контроля при диагностике бурового инструмента // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2018. – № 8. – С. 32–37. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-8-32-37.

- Bernd, R., Walte, F., Kappes, W., Kroening, M. Ultrasonic and Eddy-Current Inspection of Rail Wheels and Wheel Set Axle. 17th World Conference on Nondestructive testing, 2008. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/26920462_Ultrasonic_and_Eddy-current_inspection_of_rail_wheels_and_wheel_set_axles. Доступ 16.05.2024.

- Шевелев А. В. Методы и средства ультразвукового неразрушающего контроля цельнокатаных колес вагонов // *Дисс. канд. техн. наук*. – СПб.: ПГУПС, 2004. – 142 с. [Электронный ресурс]: <https://new-disser.ru/avtoreferats/01002621891.pdf>. Доступ 16.05.2024.

- Отока А. Г., Холодилов О. В. Сравнительный анализ применения контактных жидкостей в дефектоскопии на примере ультразвукового контроля поверхности катания цельнокатаного колеса // *Транспортное машиностроение*. – 2024. – № 3. – С. 4–11. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-3-4-11.

- Платунов А. В., Муравьев В. В., Муравьева О. В. Ультразвуковой контроль поверхности катания железнодорожных вагонных колес и бандажей локомотивов с использованием рэлеевских волн // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2023. – Т. 21. – № 2. – С. 41–48. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-41-48.

- Cremona, C. Inspection of welded joints: reliability of ultrasonic inspection and inspection intervals. Conference Paper in IABSE Congress Report, 2012, pp. 597–604. DOI: 10.2749/222137912805110934.

- Киреев А. Н., Склифус Я. К., Киреева М. А. Повышение достоверности и информативности ультразвукового контроля литых деталей подвижного состава железных дорог // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2019. – Т. 19. – № 4. – С. 335–341. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-4-335-341.

- Jemec, V., Grum, J. Latest methods of non-destructive testing of railway vehicles. The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing in Engineering, 2005, pp. 69–79. [Электронный ресурс]: <https://www.ndt.net/article/ndt-slovenia2005/PAPERS/08-NDTP05-70.pdf>. Доступ 16.05.2024.

- Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1991. – 283 с. ISBN 5-06-002038-X.

- Киреев А. Н. Особенности ультразвукового контроля катаных колесных центров локомотивов в радиальном направлении // *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. – 2006. – № 12. – С. 133–137. EDN: VHWOD.

Информация об авторах:

Отока Александр Генрикович – магистр технических наук, аспирант Белорусского государственного университета транспорта; инженер-технолог (руководитель подразделения неразрушающего контроля) Гомельского вагонного депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», Гомель, Республика Беларусь, otokaa@mail.ru.

Холодилов Олег Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Белорусского государственного университета транспорта, Гомель, Республика Беларусь, olhol@tut.by.

Статья поступила в редакцию 08.05.2024, одобрена после рецензирования 10.09.2024, принята к публикации 12.09.2024.