

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ КОНТРОЛЕ РЕЛЬСОВ

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

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

*E-mail: amarkovspb@gmail.com

Поступила в редакцию 08.12.2020; после доработки 22.12.2020

Принята к публикации 15.01.2021

Приведены результаты исследований параметров ультразвуковых сигналов с увеличением скорости контроля рельсов. В качестве тестовых отражателей выбраны сигналы от болтовых отверстий рельсов. Показано, что ближайшие к рельсовому стыку отверстия озвучиваются не полностью, и сигналы от них не могут быть использованы в качестве тестовых отражателей. Для полноценной оценки ухудшения качества неразрушающего контроля рельсов с увеличением скорости сканирования предложено использовать интегральный показатель анализируемого отражателя. Заметное уменьшение этого показателя при высоких скоростях требует принятия компромиссного решения при выборе между производительностью и качеством контроля рельсов. Предложенная методика может быть использована для оценки эффективности эксплуатируемых и вновь создаваемых дефектоскопических комплексов. Обоснована необходимость совершенствования способов озвучивания первых болтовых отверстий стыков и корректировки нормативных документов применительно к высокоскоростному контролю рельсов.

Ключевые слова: ультразвук, дефектоскопия, рельсы, высокоскоростной контроль, развертка типа В, параметры сигналов, условная протяженность отражателя, интегральный показатель.

DOI: 10.31857/S0130308221030015

ВВЕДЕНИЕ

Требования к увеличению скорости сканирования при ультразвуковом (УЗ) контроле рельсов всегда были актуальными [1—4]. Если не так давно скорости сканирования 90 км/ч казались предельными [1—3], то в настоящее время уже декларируется возможность контроля при скоростях до 140 км/ч [4].

В последние годы неоднократно проводились эксперименты по прицепке вагонов-дефектоскопов к пассажирским поездам и работе дефектоскопического оборудования в составе диагностических комплексов инфраструктуры (ДКИ) со скоростями движения до 120 км/ч. Но на практике реально реализуемые скорости редко превышали 110 км/ч. По мере накопления информации с этих проездов появляется возможность исследования параметров сигналов контроля рельсов.

Целью настоящих исследований является оценка качества контроля рельсового пути в широком диапазоне скоростей сканирования. Результаты этих исследований могут быть применены как для дальнейшего совершенствования систем скоростного контроля, так и для обоснования предельных скоростей сканирования при заданных критериях обнаружения искомых дефектов.

1. МЕТОДИКА АНАЛИЗА СИГНАЛОВ КОНТРОЛЯ

Имеющиеся на многих железных дорогах специальные (испытательные) участки пути с разными моделями дефектов рельсов предназначены для настройки и проверки работоспособности аппаратуры вагонов-дефектоскопов предыдущего поколения, имеют ограниченные (малые) протяженности и редко позволяют обеспечить скорости сканирования выше 30—50 км/ч. Создание специального испытательного участка пути для высоких скоростей (до 120 км/ч) является весьма дорогостоящим проектом и не всегда технически оправдано, т.к. поверхности катания и само состояние рельсов на действующих путях и на малонагруженных испытательных участках заметно отличаются.

В то же время изучение влияния высоких скоростей контроля на характеристики сигналов от дефектов целесообразно проводить по экосигналам от отражателей с известными параметрами, зафиксированными на реальных дефектограммах. Для анализа необходимо подобрать однотипные отражатели в достаточном для статистического анализа количестве, которые имеют идентичные параметры и уверенно фиксируются во всем диапазоне скоростей сканирования.

Исходя из этих требований, в качестве тестовых отражателей нами предложено использовать отверстия болтовых стыков рельсов (рис. 1). Указанные отверстия диаметром 36 мм (для рельсов



Рис. 1. Болтовой стык рельсов в шестидырных накладках (а); на концах стыкуемых рельсов имеются по три болтовых отверстия (б).

типа Р65) выполняются в соответствии с ГОСТ Р 51685—2013 (Рельсы железнодорожные. Общие технические условия) и, несмотря на массовый переход на бесстыковой путь [5], имеются в достаточном количестве на действующих путях в зоне разрядных (уравнительных) звеньев и в местах временного восстановления рельсовых плетей. Кроме того, на железных дорогах все еще осталось немало участков звеньевых пути.

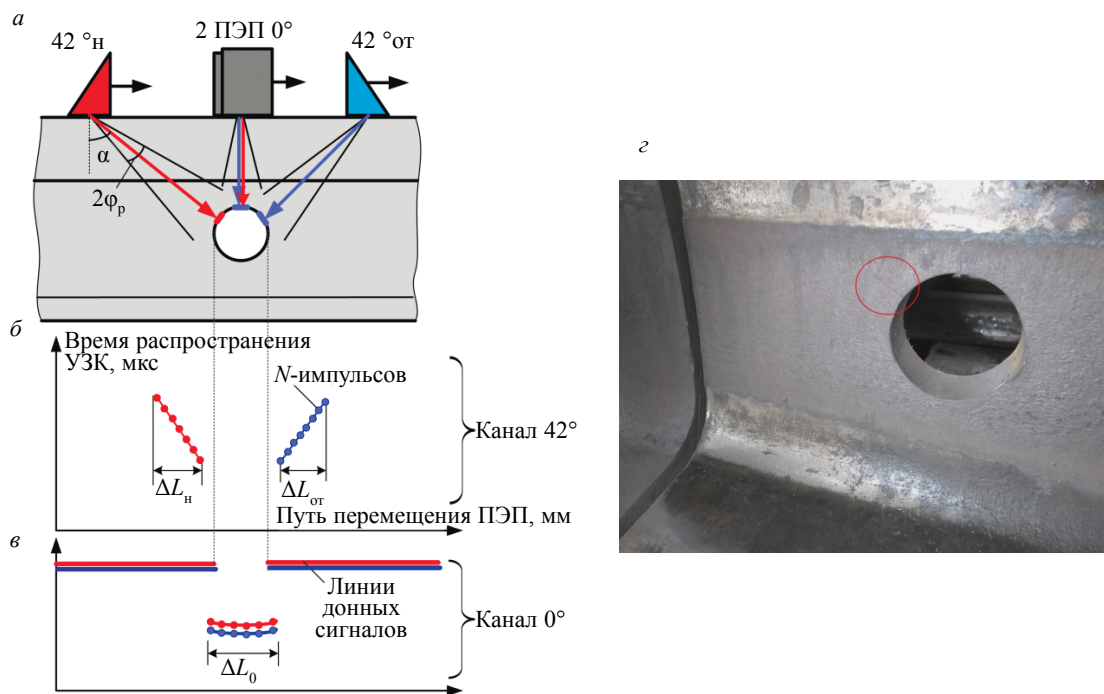


Рис. 2. Схема озвучивания болтового отверстия УЗ преобразователями (а) и отображение сигналов на развертке типа В (б — для каналов наклонных ПЭП с углом 42° ; в — для каналов ПЭП с углом 0°); з — изображение болтового отверстия с трещиной.

На рис. 2а приведена схема прозвучивания зоны шейки рельсов с отверстиями, характерная для всех средств сплошного УЗ контроля рельсов, применяемых как в России [6, 7], так и во многих странах мира [8]. В процессе движения искательной системы по поверхности катания рельса боковые стенки отверстия последовательно озвучиваются поперечными УЗ колебаниями под углами ввода $\alpha = +42^\circ$ и $\alpha = -42^\circ$ с двух сторон «наезжающим — н» и «отъезжающим — от» пьезопреобразователями (в некоторых системах контроля эти углы принимают равным $\pm 45^\circ$ или $\pm 35^\circ$ [6, 8]). На дефектограмме (развертке типа В [6]) формируются две наклонные линии (пачки) сигналов с количеством импульсов N и условной протяженностью по длине рельса ΔL (рис. 2б). Прямые пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) осуществляют ввод продольных УЗ колебаний нормально ($\alpha = 0^\circ$) к поверхности сканирования. По мере сканирования отражения от верхней стенки отверстия на развертке типа В формируют дугообразные пачки сигналов и прерываются линии донных сигналов (рис. 2в).

Диапазон анализируемых скоростей контроля рельсов выбран из следующих соображений. Еще совсем недавно (2000—2017 гг.) на сети дорог ОАО «РЖД» установленная скорость контроля рельсов мобильными средствами составляла 35 км/ч. Согласно «Положению о системе неразрушающего контроля рельсов и эксплуатации средств рельсовой дефектоскопии в путевом хозяйстве железных дорог ОАО «РЖД» (утв. расп. ОАО «РЖД» от 26.07.2017 г. № 1471/р), с 2017 г. диагностические вагоны стали проводить сплошной контроль на скоростях до 60—80 км/ч. В настоящее время (2020 г.) на Российских железных дорогах эксплуатируются более десяти ДКИ двух производителей, по паспортным данным которых допускаются скорости контроля рельсов выше 100 км/ч (на рисунках, приведенных ниже, эти средства обозначены как комплекс А и Б). В связи с этим исследование поведения дефектоскопических сигналов проводили в диапазоне от 30 до 100 км/ч.

В каждом десятикилометровом диапазоне скоростей анализировали сигналы от 200 болтовых отверстий (всего проанализированы параметры сигналов от более 1400 отверстий). Подсчет количества обнаруженных болтовых отверстий осуществлялся в соответствии с требуемыми критериями сигналов от отверстий на развертке типа В, указанными в действующем нормативно-техническом документе (НТД) — «Положении по расшифровке дефектограмм» (утв. расп. ОАО «РЖД» от 09.01.2018. № ЦДИ-1/р).

Проконтролированными считались болтовые отверстия, от которых получены три группы (пачки) эхосигналов в каналах ПЭП с углами 42° и 0° (две наклонные и одна дугообразная пачка как на рис. 2б, в) с условной протяженностью $\Delta L > 20$ мм и количеством сигналов N не менее 4-5 штук (при меньшем количестве точек на развертке типа В сигналы трудно распознать как «пачку» сигналов на фоне помех) при озвучивании с каждой стороны.

Отметим, что по данному НТД анализируют (выполняют расшифровку) сигналы контроля рельсов как съёмными ($V = 4\text{—}5$ км/ч), так и мобильными (V до 60 и до 120 км/ч) средствами дефектоскопии. В то же время известно, что при постоянной частоте F посылки зондирующих импульсов количество N ожидаемых от отражателя эхосигналов обратно пропорционально скорости V сканирования и прямо пропорционально условной протяженности пачки ΔL :

$$N = (\Delta L \cdot F) / V. \quad (1)$$

Как видно (рис. 3), при типовой для вагонов-дефектоскопов частоте посылок зондирующих импульсов $F = 4,0$ кГц и условной протяженности получаемых от отражателей пачек сигналов $\Delta L = 20$ мм (красная кривая), условие обнаружения по НТД может быть выполнено только при скоростях V , не превышающих 57 км/ч. А при максимальных скоростях сканирования (120 км/ч) в зоне локации $\Delta L = 20$ мм будут приняты не более двух эхосигналов, что, естественно, недостаточно для выделения их на фоне всевозможных помех. Минимальный условный размер отражателя, обнаруживаемый при предельной скорости 120 км/ч, как видно из рис. 3, составляет более 40 мм. Для частичной компенсации этих ограничений, как будет показано ниже, в современных ДКИ принимают специальные меры.

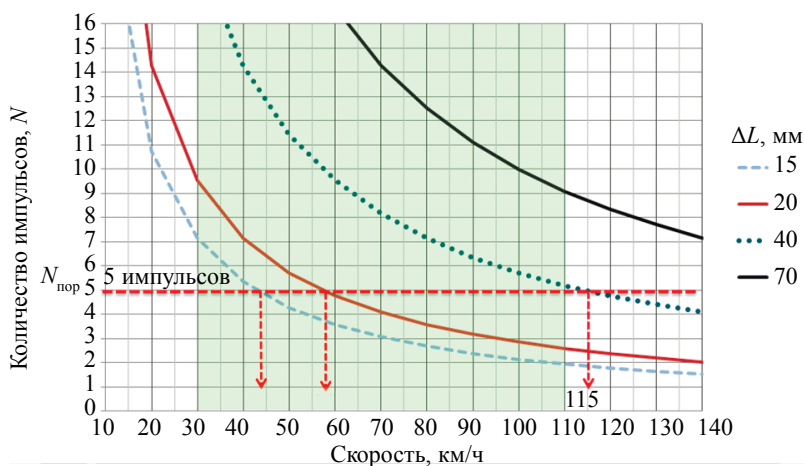


Рис. 3. Зависимость количества ожидаемых от отражателей эхосигналов от скорости сканирования для разных условных размеров ΔL дефектов (при частоте $F = 4,0$ кГц): зеленым фоном выделен диапазон исследуемой области скоростей сканирования.

Весьма интересным представляется изучение не только зависимости обнаружения ультразвуковым методом количества N типовых отражателей на разных скоростях, но и изменения их параметров: значений условной протяженности ΔL (по ГОСТ 18576—96. Контроль неразрушающий. Рельсы железнодорожные. Методы ультразвуковые), а также амплитуды эхосигналов в пачках. Их обобщающий показатель при многоканальном контроле, как показано в [9], удобно представлять в виде интегрального показателя K_{int} , формирующего более достоверную информацию присутствия дефекта (в данном случае, отверстия диаметром 36 мм) с учетом параметров всех принятых от него сигналов.

Результаты этих исследований должны позволить выяснить основные причины изменения параметров эхосигналов при реализации высокоскоростного контроля для последующего принятия мер по улучшению качества контроля.

2. ПРОБЛЕМЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КОНТРОЛЯ

Выполненный обзор отечественной и зарубежной литературы показывает, что, несмотря на начало серийного внедрения высокоскоростного контроля рельсов на железных дорогах России и других стран [1, 4, 7, 8], подробный анализ выявляемости дефектов в рельсах при высоких скоростях сканирования проводился мало.

По результатам исследований немецких специалистов [1] о зависимости обнаружения типовых дефектов от скорости можно отметить, что они получили весьма настораживающие результаты. Уже на скоростях 40—60 км/ч из 80 типовых дефектов было обнаружено менее 20 дефектов. Это позволило им сделать предварительные выводы что «скорость более 60 км/ч очень близка к физическим пределам для УЗ контроля» и «похоже, не стоит использовать инспекционные поезда со скоростью более 90 км/ч...». Причем зависимость количества успешно обнаруженных дефектов экспоненциально уменьшается с увеличением скорости.

Понимая вышеизложенные ограничения, в отечественных комплексах для высокоскоростной дефектоскопии разработчиками принят ряд мер.

Во-первых, частота F посылок зондирующих импульсов является не постоянной, а управляется пропорционально скорости сканирования V . С одной стороны, это позволяет не загружать систему излишней информацией (большим количеством импульсов) при малых скоростях сканирования, с другой стороны, — при максимальных скоростях возможно сохранить на приемлемом уровне дискретность озвучивания дефектов по длине рельсов.

Однако пределы увеличения частоты посылок зондирующих импульсов F ограничены максимальной глубиной залегания подлежащих к выявлению дефектов в подошве рельса (высота рельса типа Р65 равна 180 мм) и требуемыми углами ввода УЗ колебаний (с учетом угла раскрытия диаграммы направленности наклонных ПЭП до 50°). Таким образом, на практике частота посылок F ограничивается 5,0 кГц (межпериодный интервал не превышает 200 мкс). При этом смещение ПЭП за время пробега УЗ колебаний до дефекта и обратно при высоких скоростях уже составляет величину, сравнимую с активными размерами приемно/излучающих пьезопластин ПЭП.

Во-вторых, с учетом вышесказанного, приняты дополнительные меры по увеличению апертуры излучения/приема УЗ колебаний путем применения двух рядом расположенных однонаправленных преобразователей для фиксированных углов в схеме прозвучивания [10, 11]. Излучение в рельс ультразвуковых зондирующих сигналов несколькими однонаправленными наклонными преобразователями и получение ими отраженных ультразвуковых сигналов при совместной обработке позволяет компенсировать уменьшение количества принимаемых сигналов с увеличением скорости, обеспечивая заданное разрешение по длине рельса. Как показано ниже, эти меры вносят положительный вклад при обнаружении отражателей на высоких скоростях сканирования.

Вопреки жестко установленным в НТД (ГОСТ 34524—2019. Рельсы железнодорожные. Неразрушающий контроль в условиях эксплуатации. Общие требования) уровням чувствительности контроля рельсов без какого-либо учета скоростей сканирования и состояния контролируемых рельсов (пропущенный тоннаж, износ головки, кривые и прямые участки пути, повреждение поверхности катания микротрещинами и др.), для получения приемлемого качества контроля на значительных скоростях специалисты диагностических комплексов вынуждены повышать чувствительности контроля. Естественно, с одновременным повышением уровня помех, это позволяет несколько увеличить и зону локализации отражателей. Путем отслеживания переменного уровня шумовой составляющей и выставления порогового уровня над средним уровнем шума (адаптивный порог) удастся повысить эффективность скоростного контроля [12]. Учет скорости нараста-

ния переднего фронта искомых эхосигналов от дефектов, как утверждают авторы [13], дополнительно повышает эффективность адаптивного порога.

Весьма важной и нерешенной полностью проблемой при значительных скоростях сканирования является обеспечение стабильного акустического контакта в реальных условиях контроля рельсового пути. Выбор износостойких протекторов УЗ преобразователей (ПЭП), оптимизация систем подачи контактирующей жидкости и прижатия ПЭП к поверхности сканирования позволяют только частично обеспечивать относительно приемлемый контроль рельсов на столь высоких скоростях движения [7, 9].

Необходимо также отметить, что зона болтовых стыков, с точки зрения дефектоскопии, является весьма сложным участком. Даже на участках пути, полностью удовлетворяющих эксплуатационным требованиям, на концах рельсовых звеньев могут наблюдаться некоторые отклонения от геометрии (понуры и смещения концов рельсов в вертикальной и горизонтальной плоскостях, поверхностные расслоения и т. п.). С увеличением скоростей сканирования эти отклонения, даже если они находятся с точки зрения эксплуатации пути в допустимых пределах, отрицательно влияют на качество контроля.

В совмещенных вагонах-дефектоскопах (с рабочими скоростями до 60 км/ч) для размещения дефектоскопического оборудования (искательной системы) применяли дополнительную индукторную тележку, располагаемую под средней частью вагона [6], что создавало благоприятные условия для размещения системы намагничивания для реализации магнитного метода контроля (метода вытеснения магнитного потока — MFL) [14, 15] и подвески блоков ультразвуковых преобразователей с системами прижатия и центровки. В новых диагностических комплексах, по соображениям безопасности при высоких скоростях контроля, искательные системы пришлось разместить в ограниченных пределах ходовых тележек. Это решение существенно усложнило задачу обеспечения стабильного акустического контакта между преобразователями и поверхностью контролируемого рельса. К уже имеющимся проблемам добавился и неравномерный упругий прогиб рельсов на болтовых стыках под ходовой тележкой вагона (под весом вагона, распределенным до 10 т на каждое колесо), также усложняющий задачу обеспечения стабильного акустического контакта.

Несмотря на указанные сложности и проблемы, принятые технические решения позволили получить более или менее допустимые результаты в рассматриваемом диапазоне скоростей сканирования.

3. АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВА ОБНАРУЖИВАЕМЫХ ОТВЕРСТИЙ

3.1. Общее количество выявляемых болтовых отверстий

На рис. 4 приведены результаты анализа выявляемости (в соответствии с требованиями Положения о расшифровке) болтовых отверстий наклонными ПЭП с углом 42° в диапазоне скоро-

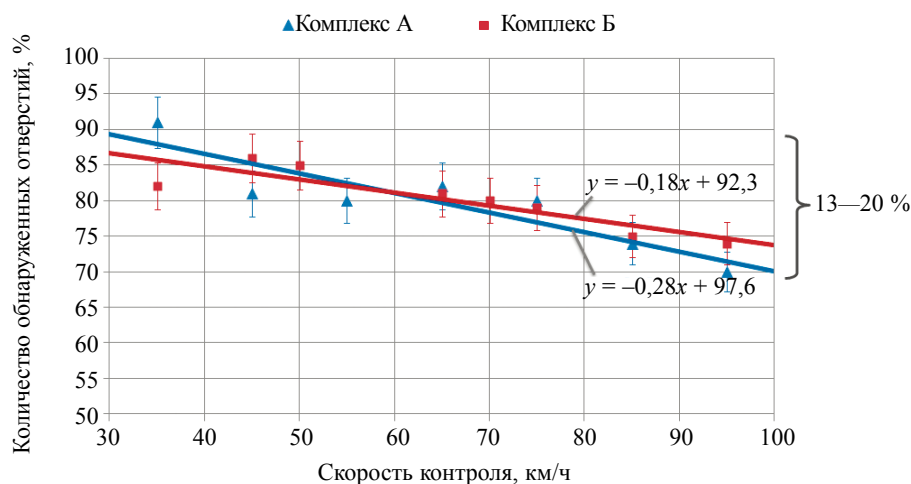


Рис. 4. Количество (в %) зафиксированных наклонными ПЭП с углом 42° болтовых отверстий на разных скоростях УЗ контроля.

стей контроля от 30 до 100 км/ч для двух систем скоростного контроля разных производителей. Данные получены при контроле обычных путей протяженностью 140 км со смешанным движением пассажирских и грузовых поездов (комплекс дефектоскопии А) и на участках пути с высокоскоростным движением (на участке Москва — Санкт-Петербург) с общей протяженностью 170 км (комплекс Б). Качество содержания пути на выбранных участках не оказало существенного влияния на результаты контроля (содержание пути на участке контроля комплексом Б заметно лучше), хотя очевидно, что с ухудшением содержания пути результаты измерений могут быть хуже.

Как видно, обе системы высокоскоростного контроля рельсов, несмотря на определенные отличия в принятых технических решениях, в указанном диапазоне скоростей болтовые отверстия выявляют практически идентично (в пределах допустимой погрешности). Это может свидетельствовать о том, что процессы, отрицательно влияющие на обнаружение отражателей при высоких скоростях сканирования, в основном, имеют общую закономерность.

Угол наклона полученных на рис. 4 линейных зависимостей показывает ухудшение выявляемости отверстий на 2—3 % при каждом увеличении скорости сканирования на 10 км/ч. Выявляемость таких больших (с точки зрения дефектоскопии) отражателей в рельсах, как болтовых отверстий диаметром 36 мм, при увеличении скорости от 30 до 100 км/ч снижается на 13—20 %.

Сравнивая полученные результаты с исследованиями немецких специалистов [1] по зависимости обнаружения характерных дефектов рельсов от скорости, можно отметить, что они получили несколько иные результаты. Видимо, реализация рассмотренных в разделе 2 технических решений позволило вместо экспоненциального спада обнаруживаемых отражателей [1] получить линейную зависимость (рис. 4) с приемлемым для высоких скоростей контроля коэффициентом спада. Возможно, существенные отличия в результатах вызваны и тем, что в [1] рассматривали выявляемость разных типов дефектов, а в данном исследовании — однотипные округлые отражатели (болтовые отверстия) достаточно большого размера.

В то же время можно отметить, что реальные дефекты, как правило, обнаруживаются одновременно несколькими каналами. В частности, при фиксации дефекта в головке рельса оператор в большинстве случаев принимает решение по сигналам, полученным от двух до девяти каналов [16], причем размеры пачек сигналов при этом весьма часто не уступают размерам сигналов от болтовых отверстий. От реальных дефектов в шейке и в подошве рельса во многих случаях фиксируются группы сигналов, принятых наезжающим и отъезжающим ПЭП с размерами, также не уступающими размерам пачек сигналов от болтовых отверстий. Естественно, в реальных ситуациях контроля возможны случаи фиксации дефектов на начальной стадии развития только одним из каналов с весьма малыми размерами. В целом, можно считать, что сигналы от болтовых отверстий при проведении экспресс-оценки эффективности контроля при больших скоростях вполне могут служить в качестве имитаторов сигналов от реальных дефектов рельсов.

Для повышения надежности контроля и отслеживания качества акустического контакта в схеме прозвучивания дефектоскопного комплекса А используется два прямых ПЭП с углами ввода 0° , размещенные в начале и в конце искательной системы (рис. 5) [6, 7]. Сигналы двух прямых ПЭП отображаются в общей зоне регистрации и специально несколько смещены друг над другом для улучшения наглядности при анализе дефектограмм (см. рис. 2в).

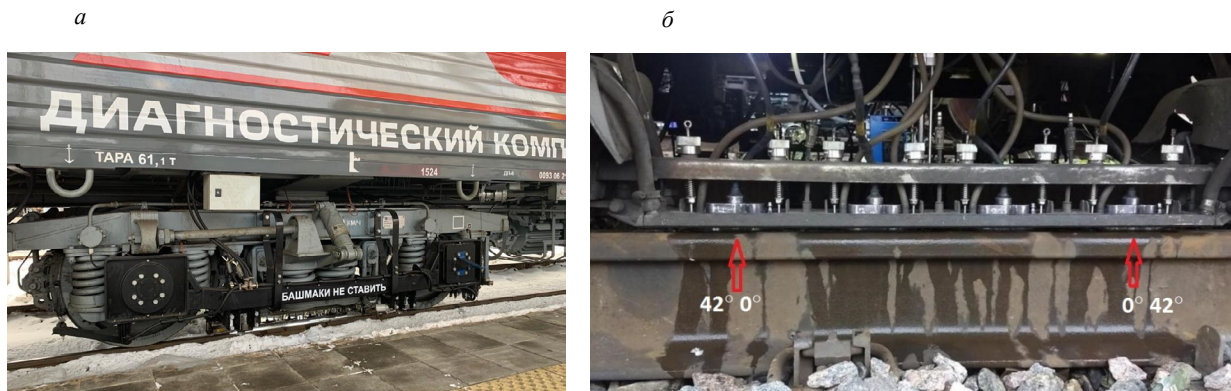


Рис. 5. Искательная система диагностического комплекса:
 а — размещение дефектоскопической лыжи между колесами ходовой тележки вагона; б — стрелками и цифрами указаны ПЭП с соответствующими углами ввода для контроля шейки рельса.

Дублирование каналов прямых ПЭП с углом ввода 0° , реализующих эхо и зеркально-теневой методы, дает весьма положительные результаты, особенно при высоких скоростях сканирования. Значительно уменьшается количество непроконтролированных участков после проезда вагона-дефектоскопа, которые приходится повторно перепроверять (например, съемными дефектоскопными тележками). Количество выявленных отверстий прямыми ПЭП оказалось примерно на 10 % больше, чем наклонными ПЭП с углом 42° . Применение парных ПЭП [10] с углом ввода 42° также ощутимо повышает обнаружение отверстий при увеличении скоростей (до 10 % при скоростях выше 75 км/ч).

3.2. Выявляемость болтовых отверстий вблизи стыкового зазора

Для дальнейшего развития скоростной дефектоскопии весьма важно установить основные причины снижения выявляемости типовых отражателей с увеличением скорости сканирования.

Одной из возможных причин может являться особенность формирования сигналов от болтовых отверстий в зависимости от их расстояния до стыкового зазора рельсов. Как показано нами ранее [17, 18], первые от стыка отверстия¹ по ряду причин озвучиваются хуже, чем остальные. Это вызвано динамическими воздействиями неровностей стыков на акустический блок, частичным уходом контактирующей жидкости в стыковой зазор и худшим состоянием поверхности катания рельсов именно в зоне стыка.

Если со стороны основного металла рельсов данные отверстия озвучиваются полноценно, то со стороны торцов рельсов отверстия озвучиваются не полностью (рис. 6а). Из-за близости первых отверстий к торцам стыкуемых рельсов (расстояние до центров отверстий всего 96 мм для рельсов типа Р65 и 66 мм — для рельсов Р50) зона локализации этих отверстий ограничена и на практике составляет всего около 30 — 40 мм. В результате, на отдающем конце рельса «отъезжающий», а на приемном конце «наезжающий» ПЭП не могут полностью озвучивать первые отверстия. На развертке типа В от этих отверстий формируются пачки сигналов, имеющие существенно (в три раза) меньшие условные размеры (рис. 6б).

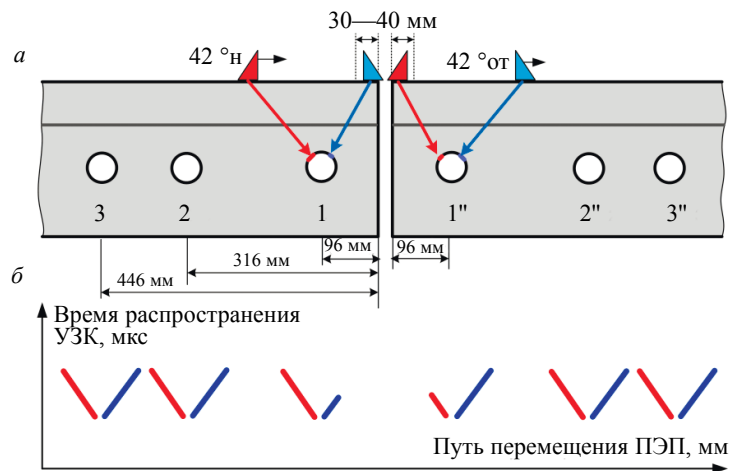


Рис. 6. Озвучивание первых болтовых отверстий наклонными ПЭП:

а — со стороны основного металла рельсов и неполное прозвучивание со стороны торцов рельсов; б — формирующиеся на В-развертке пачки сигналов от всех шести отверстий.

Действительно, если рассмотреть количество обнаруживаемых отверстий с учетом и без учета первых отверстий, то характер поведения линий выявляемости от скорости сканирования заметно меняется (рис. 7).

Как видно (см. рис. 7), основной вклад в ухудшение фиксации болтовых отверстий вносят именно первые отверстия (линия в), изначально озвучиваемые в худших условиях. Без учета отверстий № 1 снижение обнаруживаемости вторых и третьих отверстий при увеличении скорости с 30 до 100 км/ч составляет около 13 % (линия б) при общем снижении качества контроля стыков 20% (линия а).

¹В путевом хозяйстве принято, что номера болтовых отверстий всегда отсчитываются от торца рельса.

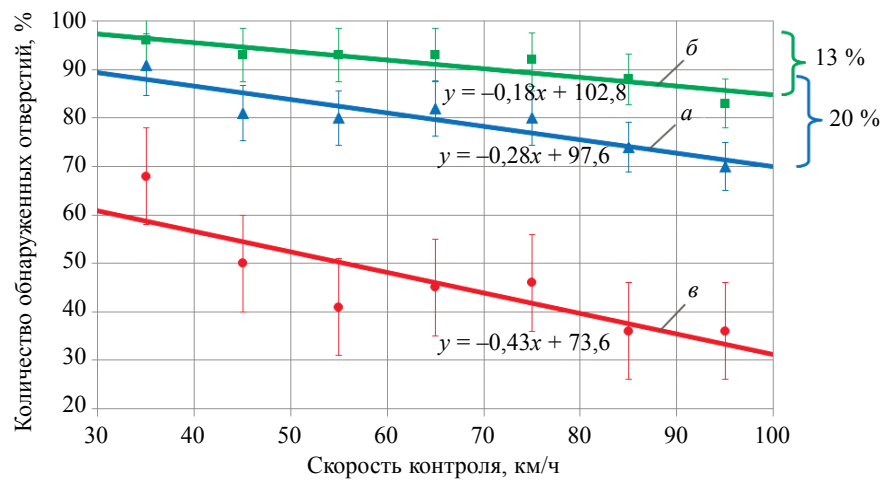


Рис. 7. Зависимость обнаружения болтовых отверстий от скорости:

a — общее количество обнаруженных отверстий; *б* — без учета первых отверстий (вторые и третьи отверстия); *в* — только первые отверстия.

Однако даже эта цифра свидетельствует о том, что при реализации высоких скоростей сканирования может быть пропущено значительное количество дефектов (из потенциальных 100 дефектов — 13 пропусков).

Выявляемость первых отверстий на скорости 100 км/ч составляет всего около 30% (линия *в*), что является весьма неудовлетворительным результатом неразрушающего контроля.

Указанные особенности подтверждают приведенные на рис. 8 фрагменты реальных дефектограмм (комплекса А). Видно, что именно из-за недостаточно полного озвучивания первых отверстий формируется неполная картина фиксации типовых отражателей в зоне стыка.

При скорости 35 км/ч все ПЭП (два наклонных и два прямых) весьма полноценно озвучивают все шесть болтовых отверстий (рис. 8*а*). Но при скорости 95 км/ч из шести отверстий только четыре отверстия можно признать зафиксированными одновременно двумя наклонными ПЭП (рис. 8*б*). Ни один из прямых ПЭП, из-за нарушения акустического контакта (пропадание донного сигнала на рис. 8*б*), не смогли озвучить первое отверстие на принимающем конце и зафиксировали всего четыре отверстия из шести.

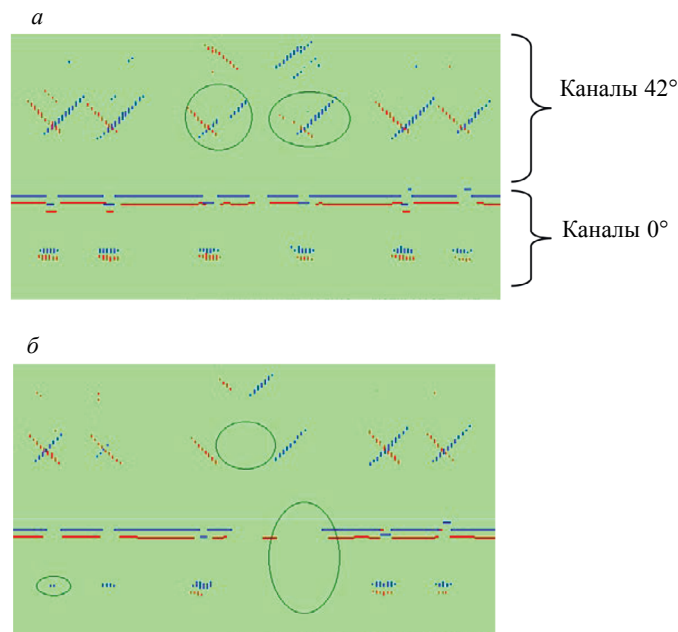


Рис. 8. Ухудшение фиксации первых отверстий на реальных дефектограммах болтовых стыков при скоростях сканирования 35 (*а*) и 95 км/ч (*б*). Выделены участки с неполной записью сигналов от отверстий.

Если отсутствие сигналов наклонных ПЭП при озвучивании первых отверстий вызвано недостаточной (короткой) зоной локации, то отсутствие сигналов прямых ПЭП, излучающих продольные волны под прямым углом, можно объяснить только значительным ухудшением акустического контакта в приторцевой зоне. На принимающем конце также негативно сказывается некоторый «полет» искательной системы после преодоления стыкового зазора.

Анализ показывает, что при озвучивании со стороны торцов рельсов уже на скорости 30 км/ч более половины первых отверстий на отдающем конце рельса не выявляются. Особенно неудовлетворительно фиксируется первое отверстие на принимающем конце рельса как прямыми, так и наклонными ПЭП (даже на скорости 30 км/ч не фиксируется более 60 % отверстий). Эти результаты согласуются с ранее полученными данными в работах [17, 18].

При скоростях сканирования 70—80 км/ч все отверстия вблизи стыкового зазора (100 % отверстий №№ 1 и 1" по рис. 6) полностью не фиксируются со стороны торцов рельсов. Это крайне опасная ситуация, т.к. известно, что трещины в болтовых отверстиях по коду 53.1, как правило, зарождаются именно в ближайших к стыку (в первых) отверстиях (см. рис. 2г, 9а), причем чаще именно на принимающем конце в стыке.

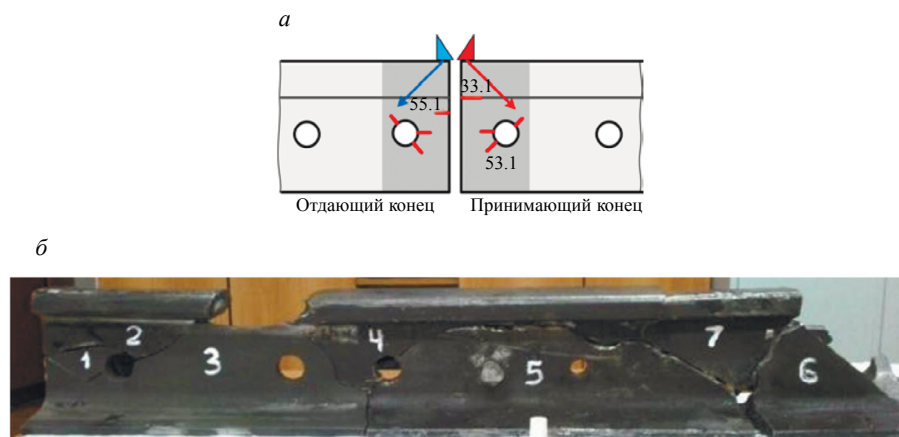


Рис. 9. Проблемные зоны болтового стыка при скоростном контроле рельсов:

а — трудновыявляемые дефекты из-за близости к стыковому зазору; б — излом рельса на множество фрагментов из-за необнаруженной трещины в первом отверстии, вызвавшей сход поезда с пути.

По статистике ОАО «РЖД» за последние 5 лет из всех изломов рельсов по дефектам кода 53.1 более 65 % происходили из-за развития трещин именно в первом болтовом отверстии. Случающиеся изломы в болтовых стыках из-за указанных трещин крайне опасны, т.к. при значительном развитии трещины может отколоться целый фрагмент рельса или рельс может развалиться на множество фрагментов (рис. 9б), при этом может произойти сход подвижного состава.

В то же время показатели обнаружения вторых и третьих отверстий могут служить потенциальным показателем качества контроля на бесстыковых участках пути в зоне основного металла рельсов. Данная методика может применяться для оценки допустимых скоростей сканирования на конкретных участках пути и оценки эффективности того или иного дефектоскопического комплекса.

4. АНАЛИЗ УСЛОВНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ СИГНАЛОВ

Для более детального анализа сигналов от типовых отражателей в зависимости от скорости сканирования рассмотрим поведение одного из основных параметров фиксируемых сигналов — условной протяженности отражателя ΔL (по ГОСТ 18576—96). Параметр ΔL , по существу, представляет собой зону локации отражателя по длине рельса в мм на заданной условной чувствительности контроля. На основе этого параметра формируются критерии обнаружения дефектов и обеспечения качества контроля. Так как ΔL является измеряемым параметром отражателя, то подразумевается, что эта величина для данного отражателя должна быть постоянной. Однако, как показано в работе [2], при значительных скоростях V условная протяженность ΔL может менять свое значение, причем тем больше, чем больше скорость контроля.

Вследствие ощутимого сдвига ПЭП за время распространения ультразвуковых колебаний до дефекта и обратно, условный размер дефекта $\Delta L_{\text{дин}}$, измеренный при динамическом режиме ($V > 0$), будет иметь меньшее значение, чем $\Delta L_{\text{ст}}$, определенного при стационарном режиме ($V \approx 0$). Причем относительное изменение $\varepsilon_{\Delta L}$ условной протяженности зависит от угловых параметров ПЭП (угла ввода α и ширины диаграммы направленности 2φ — см. рис. 2а) и, дополнительно, от направления движения ПЭП относительно дефектного сечения:

$$\varepsilon_{\Delta L} = \frac{2V}{c} \cdot \frac{\cos(\alpha_0 \mp \varphi)}{\sin \varphi}, \quad (2)$$

где нижний знак (+) соответствует удалению ПЭП от отражателя, c — скорость поперечной УЗ волны [2]. Согласно (2), условная протяженность отражателя, измеренная «наезжающим» на дефект ПЭП, при прочих равных условиях будет иметь меньшее значение, чем при измерении с «отъезжающим» ПЭП [7]. При идентичных параметрах наезжающего и отъезжающего ПЭП ($\alpha^\circ = 42^\circ$, $\varphi = 4^\circ$) при изменении скорости сканирования от 30 до 100 км/ч условная протяженность отражателя $\Delta L_{\text{дин}}$ для наезжающего ПЭП будет меньше на 6—19 %, а для отъезжающего — на 5—17 % соответственно по сравнению с измеренным в стационарных условиях значением $\Delta L_{\text{ст}}$ (табл. 1).

Таблица 1

Уменьшение (в %) условной протяженности $\Delta L_{\text{дин}}$ дефекта от скорости сканирования по сравнению со значениями, полученными в стационарных условиях ($\Delta L_{\text{ст}}$)

Направление озвучивания дефекта	Скорость сканирования	
	30 км/ч (8,33 м/с)	100 км/ч (27,78 м/с)
К дефекту («наезжающий» ПЭП)	5,8	19,3
От дефекта («отъезжающий» ПЭП)	5,1	17,0

Естественно, такую своеобразную компрессию условной протяженности необходимо учитывать при анализе сигналов высокоскоростного контроля. Уменьшение ΔL в реальных ситуациях на большую величину, чем рассчитанную по (2), свидетельствует и об иных влияющих на измеряемый параметр причинах.

На рис. 10 показано усредненное (по наезжающему и отъезжающему каналам с углом 42°) значение условной протяженности сигналов ΔL (зоны локации отражателя по длине рельса в мм) от разных болтовых отверстий (считая от торца). Как и следовало ожидать, третьи и вторые отвер-

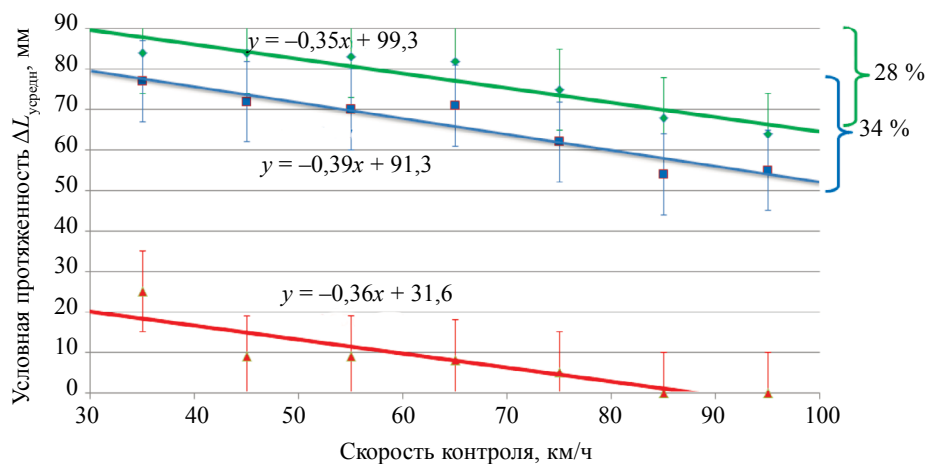


Рис. 10. Уменьшение условной протяженности ΔL (в мм) сигналов от разных отверстий для наклонных ПЭП 42° при увеличении скорости контроля.

ствия озвучиваются (с обеих сторон) примерно одинаково, поэтому они объединены в единую зависимость (линия зеленого цвета на рис. 10).

Для первых болтовых отверстий на рис. 10 приведены две зависимости: при полноценном озвучивании отверстия со стороны основного металла (линия синего цвета) и при неполноценном контроле со стороны торца рельса (линия красного цвета).

Первые отверстия с «удобной» стороны формируют пачки сигналов с несколько меньшей (примерно на 5 %) условной протяженностью, чем третьи отверстия, и, с учетом близости к стыковому зазору, являются вполне полноценными пачками сигналов. Однако значение ΔL при озвучивании первых отверстий со стороны торца в 4—6 раз (!) меньше, чем со стороны основного металла. Параметр ΔL не удовлетворяет условиям обнаружения по Положению о расшифровке уже на скорости 35 км/ч (см. рис. 10). Этот факт требует дополнительных исследований и поиска технических решений по повышению качества контроля приторцевых участков рельсов, а также корректировки НТД, определяющих браковочные признаки дефектов при высокоскоростном контроле рельсов.

В то же время, общая тенденция изменения среднего значения условной протяженности при увеличении скорости сканирования сохраняется для всех отверстий. На скорости 100 км/ч значение ΔL для указанных отверстий уменьшается примерно на 30—35 % по сравнению со скоростью 30 км/ч.

5. АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Предусмотренная в НТД оценка браковочных уровней по величине условного размера ΔL учитывает только один из возможных параметров пачки эхосигналов: зону фиксации эхосигналов от отражателя по длине рельса. Однако весьма важным параметром является и амплитуда каждого эхоимпульса в группе сигналов и количество УЗ каналов, среагировавших на искомый отражатель.

Для полноценного анализа сигналов от отражателей в рельсах с учетом всех факторов ранее [9] нами предложен обобщающий (интегральный) показатель K_{int} анализируемого отражателя.

Интегральный показатель K_{int} представляет собой линейную комбинацию отдельных показателей K_n , $n = 1, \dots, M$, в M дефектоскопических каналах комплекса, зафиксировавших сигналы от дефекта:

$$K_{\text{int}} = \sum_{n=1}^M a_n K_n, \quad (3)$$

где $0 \leq a_n \leq 1$ — весовой коэффициент канала n ($\sum_{n=1}^M a_n = 1$).

Показатель K_n в отдельном канале определяется выражением:

$$K_n = \frac{l \cdot (U_1 + U_2 + \dots + U_N)}{m_n} = \frac{l \cdot \sum_{i=1}^N U_i}{m_n}, \quad (4)$$

где N — количество принятых эхоимпульсов в пачке (в одном канале); U_i — амплитуда i -го эхосигнала в пачке; l — шаг сканирования по длине рельса; m_n — максимально возможный сигнал от дефекта для нормирования показателя K_n ($0 \leq K_n \leq 1$).

Интегральный показатель позволяет не просто зафиксировать количество сигналов от отражателей, а оценить качество получаемых сигналов с учетом амплитуды всех эхоимпульсов и условной протяженности каждой пачки, принятых от искомого отражателя по мере сканирования рельсов одновременно по всем каналам дефектоскопа.

На рис. 11 показано ухудшение интегральных (усредненных по всем каналам с углами 42 и 0°) показателей K_{int} для разных отверстий в стыке при увеличении скорости контроля. Как видно, показатели качества от всех отверстий синхронно ухудшаются в среднем на 55 % (на 45—65%) при изменении скорости с 30 до 100 км/ч.

При детальном анализе качества сигналов (показателя K_n) от первых отверстий отдельно в каналах с углом 42° (рис. 12) видно, что первые отверстия даже при озвучивании со стороны основного металла фиксируются на 15 % слабее, чем третьи отверстия. При их озвучивании со стороны торцов рельсов качество получаемых сигналов многократно хуже.

Сравнивая зависимости на рис. 10 и 12, можно отметить, что для третьих и первых отверстий, прозвучиваемых со стороны основного металла, с увеличением скорости с 30 до 100 км/ч показатель K_n падает более круто (на 40—65 %) по сравнению с условной протяженностью сигналов ΔL

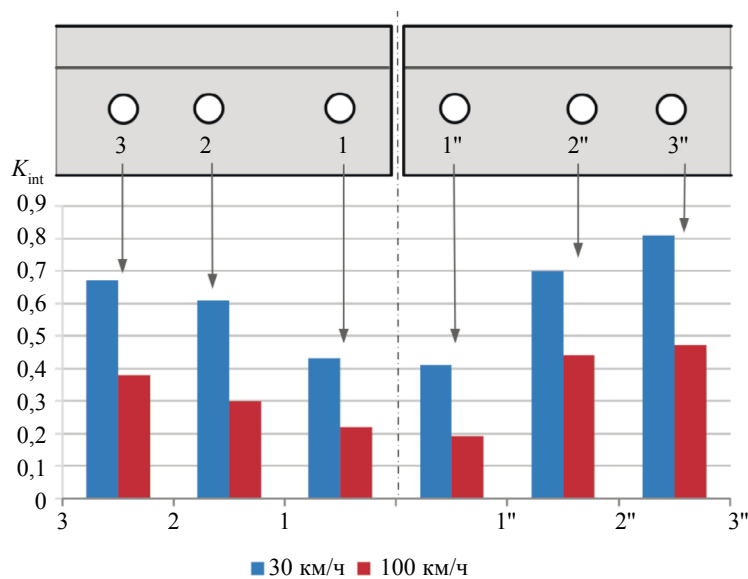


Рис. 11. Изменение интегрального показателя K_{int} отверстий в болтовом стыке (суммарно по каналам с углами 42 и 0°) для скоростей 30 и 100 км/ч.

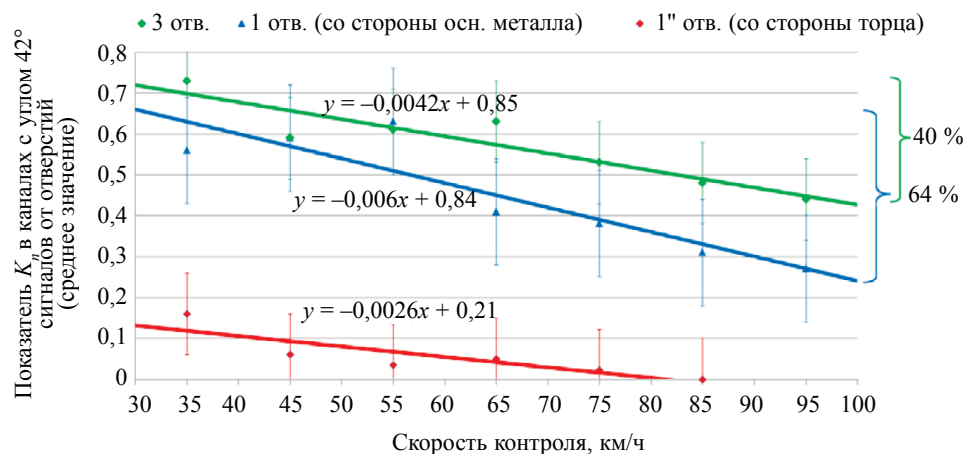


Рис. 12. Изменение показателя K_n сигналов от третьего и первого болтовых отверстий при озвучивании их наезжающим и отъезжающим ПЭП с углами 42°.

(на 30—35%). Это свидетельствует о заметном уменьшении не только количества регистрируемых экосигналов, но и об уменьшении их амплитуд.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С развитием высокоскоростного движения будут расти и требования к контролю рельсов на скоростях, близких к скоростям движения графических поездов. Задачи создания высокоскоростных средств дефектоскопии и методологии оценки их эффективности безусловно будут актуальны в ближайшие годы.

Из результатов проведенных исследований видно, что при анализе качества контроля рельсов и формулировке требований к этому качеству зону болтовых стыков необходимо разделить на две: зону первых болтовых отверстий и зону вторых и третьих отверстий.

Можно предположить, что закономерности изменения сигналов от скорости сканирования во второй зоне идентичны и для основного металла рельсов. Поэтому, не отрицая необходимость проведения тестовой эксплуатации высокоскоростных комплексов на специально подготовленных испытательных участках, методику оценки работоспособности и эффективности мобильных средств по фиксации сигналов от болтовых отверстий (вторых и третьих отверстий) на заявляемых

скоростях контроля можно рекомендовать как быстрый и малозатратный метод испытаний. Предложенную экспресс-методику можно использовать для оценки эффективности того или иного дефектоскопического комплекса рельсов и определения допустимых скоростей сканирования на участках пути разной категории.

Резкое снижение качества озвучивания приторцевой зоны болтовых стыков (зоны первых отверстий) с увеличением скорости сканирования, видимо, вызвано одновременно проявляющимися несколькими факторами:

- недостаточной зоной озвучивания со стороны торца (3—4 см);
- неровностями и повреждениями поверхности катания в зонах стыковки двух рельсов;
- неравномерным упругим прогибом рельсов на болтовых стыках под ходовой тележкой вагона. Работы по детальному изучению этих причин путем математического моделирования динамического взаимодействия искательной системы и неровностей болтового стыка уже начаты.

Параллельно, с учетом уже выявленного фактора недостаточной зоны озвучивания со стороны торца, требуется разработать специальную схему прозвучивания зоны первых болтовых отверстий с максимальным отдалением излучающе-приемных преобразователей от торцов рельсов. Ранее для улучшения качества контроля в этой зоне было предложено использовать колесные УЗ преобразователи с упругими оболочками [19]. Они действительно решают проблему при скоростях до 30—55 км/ч. Однако при более высоких скоростях возникают весьма сложные технические проблемы [20, 21], несмотря на значительные финансовые и временные затраты, не поддающиеся решению уже много лет ведущим фирмам мира, занимающимся рельсовой дефектоскопией. Одним из вариантов схем может явиться применение продольных волн при наклонном вводе ультразвуковых колебаний с одновременным использованием эхо и зеркально-теневых методов с дополнительным анализом огибающей последовательности донных сигналов [22].

Наиболее информативными, с точки зрения оценки качества озвучивания типовых отражателей, являются не отдельные параметры ультразвуковых сигналов (количество обнаруженных отверстий, ΔL , N , U_i), а интегральный показатель K_{int} анализируемого отражателя. Поэтому и оценку качества озвучивания рельса при разных скоростях контроля необходимо выполнять с его использованием.

Качество обнаружения сигналов от типовых отражателей с увеличением скоростей сканирования от 30 до 100 км/ч снижается на 45—65 %. Этот факт необходимо учитывать при оценке достоверности контроля на высоких скоростях сканирования и при определении стратегии обеспечения безопасности движения поездов путем выбора оптимальной периодичности и скоростей контроля. Поэтому выбор обоснованной скорости сканирования является компромиссом между производительностью и достоверностью контроля (быстро, но не слишком качественно, или контроль с меньшей производительностью, но эффективнее).

Настоящие исследования являются предварительными, полученными при анализе сигналов контроля главных путей в зимне-весенний (февраль—апрель) период. С целью выработки предложений по разработке нормативных требований контроля с обоснованием допустимых скоростей сканирования и для других категорий рельсовых путей целесообразно продолжить исследований в более широком диапазоне условий их эксплуатации.

ВЫВОДЫ

1. Показано заметное снижение качества ультразвукового контроля железнодорожных рельсов с увеличением скорости сканирования. Этот факт необходимо учитывать при определении стратегии обеспечения безопасности движения поездов путем принятия компромиссного решения между производительностью и качеством контроля.

2. Рассмотрены причины уменьшения значений основных параметров эхосигналов от болтовых отверстий на больших скоростях сканирования.

3. Введение новых технических решений в скоростных системах контроля позволило повысить качество обнаружения болтовых отверстий до допустимого для высоких скоростей уровня.

4. Предложенную методику оценки качества контроля по степени выявляемости болтовых отверстий можно использовать для экспресс-оценки достоверности контроля рельсов при высоких скоростях сканирования.

5. Показана необходимость разработки новых методов или схем прозвучивания для контроля весьма опасного участка болтового стыка — приторцевых зон рельсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thomas H.-M., Heckel T., Hanspach G.* Advantage of a Combined Ultrasonic and Eddy Current Examination for Railway Inspection Trains // *Insight*. 2007. No 49 (6). P. 341—344.
2. *Марков А.А.* Особенности оценки условных размеров дефектов при значительных скоростях сканирования // *Дефектоскопия*. 1989. № 3. С. 8—11.
3. *Orjelic V., Aharoni R., Krug G.* Comparative Data Analysis for Optimal High-Speed Railways Testing / 8th European Conference on NDT (ECNDT 2002). 2002. Barcelona (Spain).
4. *Тарабрин В.Ф.* Реализация скоростной комплексной диагностики железнодорожной инфраструктуры // *Евразия вести*. 2018. № 9. С. 5—6.
5. *Лужин С.В., Лужин В.С., Бондаренко А.А.* Повышение эффективности ведения путевого хозяйства // *Путь и путевое хозяйство*. 2017. № 4. С. 34—37.
6. *Марков А.А., Кузнецова Е.А.* Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Книга 2. Расшифровка дефектограмм. С-Пб.: Ультра Принт, 2014. 332 с.
7. *Волков И. Ю., Зверев А.А.* Опыт эксплуатации вагона дефектоскопа АВИКОН-03М // *Путь и путевое хозяйство*. 2019. № 8. С. 7—10.
8. *Papaelias M., Roberts C., Davis C.* A review on non-destructive evaluation of rails: State-of-the-art and future development // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2008. V. 222. No 4. P. 367—384.
9. *Markov A.A., Maksimova E.A., Antipov A.G.* Analyzing the Development of Rail Defects Based on Results of Multichannel Periodic Testing // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55 No. 12. P. 875—886. [*Марков А.А., Максимова Е.А., Антипов А.Г.* Анализ развития дефектов рельсов по результатам многоканального периодического контроля // *Дефектоскопия*. 2019. № 12. С. 3—15.]
10. *Мосягин В.В., Васильев С.А., Маховиков С.П.* Способ высокоскоростного ультразвукового контроля рельсов / Патент на изобретение № 2715885. Оpubл. 04.03.2020. Бюл. № 7.
11. *Тарабрин В.Ф., Юрченко Е.В., Анисимов В.В.* и др. Способ высокоскоростного ультразвукового контроля рельсов / Патент на изобретение № 2440568. Оpubл. 20.01.2012. Бюл. № 2.
12. *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.
13. *Тарабрин В.Ф., Одынец С.А., Чистякова О.Е.* и др. Способ ультразвукового контроля / Патент на изобретение № 2662464. Оpubл. 26.07.2018. Бюл. № 21.
14. *Antipov A.G., Markov A.A.* 3D simulation and experiment on high speed rail MFL inspection // *NDT & International*. 2018. V. 98. No. 9. P.177—185.
15. *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. [*Антипов А.Г., Марков А.А.* Выявляемость дефектов в рельсах магнитным методом // *Дефектоскопия*. 2019. № 4. С. 21—29.]
16. *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.
17. *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.
18. *Марков А.А., Гараева В.С.* Об акустическом контакте в зоне болтовых стыков // *Путь и путевое хозяйство*. 2008. № 12. С. 15—17.
19. *Марков А.А., Олейник В.Е.* Ультразвуковой контроль ответственных объектов с помощью колесных преобразователей с эластичным протектором // *MEGATECH*. 2012. № 4. С. 18—23.
20. *Марков А.А.* Зарубежные системы контроля рельсов: зарубежная техника // *Путь и путевое хозяйство*. 2010. № 9. С. 32—40.
21. *Тарабрин В.Ф.* Сопоставление характеристик искательных систем мобильных средств дефектоскопии рельсов // *Контроль. Диагностика*. 2020. Т. 23. № 10. С. 40—48.
22. *Молотков С.Л., Мосягин В.В., Марков А.А., Иванов Г.А.* Применение продольных волн при наклонном вводе ультразвуковых колебаний для повышения эффективности дефектоскопии рельсов / Тезисы XXII Всероссийской конф. по НК и ТД. М. 3—5.03.2020.