

УДК 681.586.773:624.072.233.5

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ РЕЛЬСОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ**А.В. ШЛЯХТЕНОК, канд. техн. наук, доц. Д.А. ДОВГЯЛО**
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрен наиболее распространенный на сегодняшний день эхо-метод ультразвукового контроля рельсов, проведен анализ дефектов, выявленных в 2015 г.; указаны характерные причины и особенности их развития. Рассмотрены перспективные способы ультразвукового контроля: дифракционно-временной метод и метод, основанный на преобразователях в виде фазированных решеток. Предложен пример практического обнаружения дефектов.

Ключевые слова: ультразвуковая дефектоскопия, промышленная диагностика, ультразвуковой датчик, обнаружение дефектов, неразрушающий контроль, эхо-метод, ультразвуковые фазированные решетки, дифракционно-временной метод.

Введение. На сегодняшний день железнодорожный транспорт является одним из наиболее распространенных видов транспорта, применяемых для перевозки грузов, пассажиров и багажа. В процессе эксплуатации рельсы, уложенные в путь, подвергаются механическим воздействиям со стороны колесных пар подвижного состава, а также климатическим воздействиям, что приводит к их износу и, как следствие, образованию внутренних дефектов.

Для разработки эффективных схем и методик контроля, а также для повышения эффективности уже существующих мероприятий, направленных на предупреждение развития дефектов рельсов, приведем их классификацию по причинам и месту развития.

В Национальной системе подтверждения соответствия Республики Беларусь НТД/ЦП 1-2-3-93 [1] подробно описаны признаки дефектных и острodefектных рельсов, причины их зарождения и особенности развития.

Причины зарождения и развития дефектов в рельсах можно разделить на две основные группы: эксплуатационные, например, неудовлетворительное состояние пути и подвижного состава, и заводские – допущенные при изготовлении рельсов.

На поверхности катания головки рельса наиболее распространены следующие дефекты:

- отслоение и выкрашивание металла по поверхности катания;
- выкрашивание на боковой выкружке головки рельса;
- выбоковины и закалочные трещины в местах буксования колес;
- выкрашивание и отслоение металла на поверхности в закаленном слое головки рельса [2].

Статистика распределения дефектов. Классификация определяет девять различных групп дефектов, которые включают в себя дефекты головки рельса (I, II, III, IV группы), дефекты шейки рельса (V группа), дефекты подошвы (VI группа) и другие дефекты, возникающие по всему сечению. Проведем рассмотрение дефектов рельсов, являющихся наиболее опасными с точки зрения их дальнейшей эксплуатации (острodefектных), выявим особенности их развития и обнаружения.

На рисунке 1 показана диаграмма распределения острodefектных рельсов, обнаруженных в 2015 г. по группам.

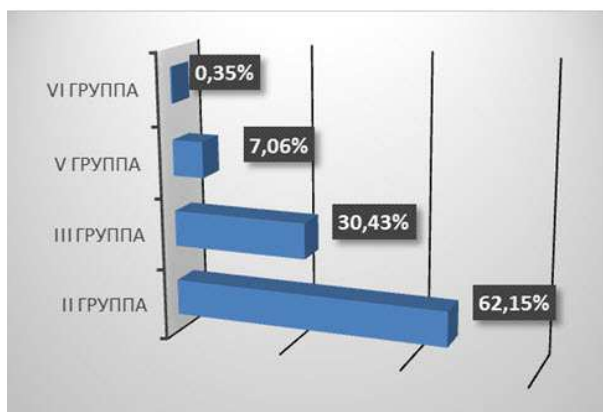


Рисунок 1. – Диаграмма распределения острodefектных рельсов, выявленных цехами дефектоскопии Белорусской железной дороги в 2015 г.

Представленные статистические данные собраны за период с 01.01.2015 по 31.12.2015 г. по дистанциям пути Белорусской железной дороги, на базе которых организованы цеха, занимающиеся проведением ультразвукового контроля рельсов.

Основная часть выявленных острodefектных рельсов приходится на дефекты II группы – поперечные трещины в головке рельса в виде темных и светлых пятен. На втором месте находятся не менее распространенные дефекты третьей группы – расслоение головки рельса. Третье место занимают дефекты пятой группы, развитие которых в основном обусловлено отклонением от норм текущего содержания рельсового хозяйства. На последнем месте – дефекты шестой группы, которые являются самыми опасными вследствие трудности их выявления. В ходе анализа, проведенного специалистами ОАО «РЖД», было установлено, что при низком показателе выявленных дефектов (единицы штук) VI группы изломы, вызванные этими повреждениями, составляют до 1/3 от их общего числа.

На рисунке 2 приведены диаграммы распределения выявленных в 2015 г. дефектов по II, III, V и VI группам.

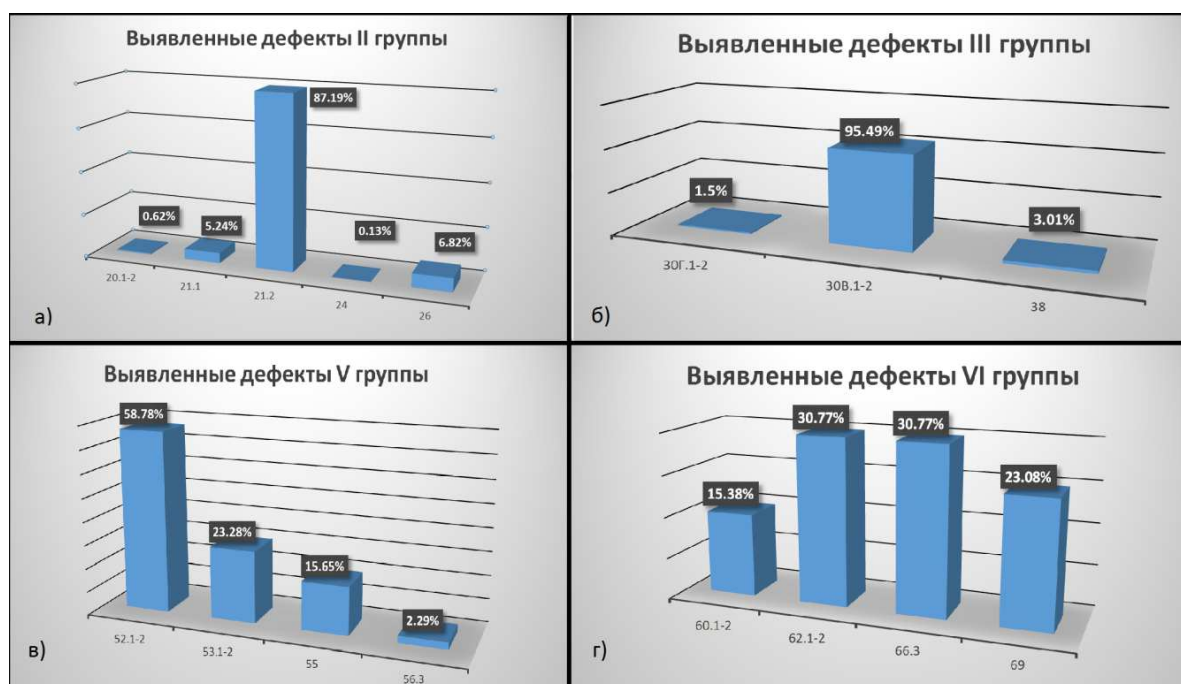


Рисунок 2. – Диаграмма распределения дефектов, выявленных в 2015 г.:
 а – дефекты II группы; б – III группы; в – V группы; г – VI группы

Дефекты второй группы (рис. 2, а) являются одними из самых распространенных. В данной группе преобладают дефекты кода 21.2, образующиеся в результате недостаточной контактно-усталостной прочности металла вследствие его физического износа и старения. Особенно опасны и трудны для выявления дефекты 21.2 в случае, если они прикрыты (замаскированы) дефектом третьей группы (код 30Г.2).

Обычно дефекты 21.2 развиваются от дефектов кода 11.2 (выкрашивание металла на боковой рабочей выкружке рельса), которые не относятся к группе острodefектных, и рельсы, на которых присутствуют данные дефекты, могут эксплуатироваться с определенными ограничениями. К наиболее вероятным местам проявления дефектов 21.2 относятся кривые участки пути, где вследствие повышенной нагрузки на внутренний рельс высока вероятность появления повреждений кода 11.2.

Следующее место по распространенности занимают дефекты кода 20.1-2. Они развиваются в результате заводского брака, допущенного при изготовлении рельса, и представляют собой газовые пузыри, флокены, неметаллические включения различного рода. Также стоит отметить отдельные виды дефектов, возникающих при отливке – повреждений кристаллической структуры. Они развиваются со временем и зачастую выявляются по прошествии достаточно продолжительного периода эксплуатации.

Дефекты кода 26 обусловлены нарушением технологии сварки рельсов. Опасность данных дефектов заключается в повышении хрупкости металла рельса в зоне сварного шва в результате нарушения его кристаллической структуры при нагревании. Нагревание металла меняет его структуру, что сказывается на коэффициенте затухания ультразвуковых колебаний в рельсе и искажает результаты контроля.

Последнее место занимают дефекты кода 24, обусловленные воздействием колес подвижного состава, пробуксовками.

Значительную часть из всех выявленных повреждений представляют дефекты III группы (рис. 2, б). Их основную массу составляют горизонтальные расслоения головки рельса. Эти дефекты опасны тем, что под ними могут развиваться дефекты II группы, которые вследствие нахождения их «под прикрытием» могут быть пропущены из-за конструктивных особенностей пьезоэлектрических датчиков, используемых для контроля. Особенностью дефекта 30Г.1-2 является возможность его развития вглубь, в сторону подошвы рельса и, как следствие, образование изломов.

Дефекты V группы (рис. 2, в) развиваются по причине нарушений норм текущего содержания пути. Помимо дефектоскопирования, данные дефекты возможно выявить и визуально, т.к. в большинстве случаев на стадии зарождения они представляют собой надрыв грани болтового отверстия или радиусного перехода головки рельса в шейку.

Кроме нарушения норм текущего содержания, дефекты V группы очень интенсивно развиваются с уменьшением температуры наружного воздуха ниже 0°C вследствие увеличения хрупкости металла.

Самыми распространенными, но тем не менее уверенно обнаруживаемыми с помощью датчиков являются дефекты 52.1-2 (трещины в подголовочной части рельса). Дефекты кодов 53.1-2, 55 и 56 (трещины от болтовых отверстий, а также образовавшиеся в результате механического воздействия или в виду нарушения технологии сварки) достаточно трудно выявить в связи с невозможностью прогнозирования направления их развития. Особенно сложно выявляются дефекты, развивающиеся от болтового отверстия в сторону торца рельса.

В распределении дефектов VI группы (рис. 2, г) наиболее преобладают дефекты кодов 61.1-2 (выколы подошвы без видимых дефектов металла) и 66.3 (выколы подошвы в результате нарушения технологии сварки), в общей сложности составляющие практически 62%. Менее распространены дефекты кода 69 (коррозийные трещины). Выколы подошвы (60.1-2) в результате нарушения технологии отливки находятся на последнем месте.

Особое внимание при контроле рельсов следует обращать на электрифицированные участки пути, где по причине воздействия на рельс блуждающих токов вероятно образование коррозии. Также к ним относятся участки, по которым перевозятся соли и калийные удобрения.

Методы контроля. Все дефекты, рассмотренные выше, выявлены при помощи дефектоскопов, реализованных на основе акустического эхо-метода.

Современные дефектоскопы представляют собой сложные устройства на микропроцессорах и микроконтроллерах, реализующие весь спектр методов неразрушающего контроля.

В зависимости от параметров контролируемого объекта, выбирается метод неразрушающего контроля, отвечающий поставленным требованиям.

В рельсовой дефектоскопии используется ультразвуковой (акустический) метод, отличающийся высокой надежностью, эффективностью и простотой реализации.

В общем случае ультразвуковые методы используют в своей основе законы акустики и особенности распространения колебаний ультразвуковой частоты в различных материалах. В качестве датчиков в них применяются пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), использующие явления прямого и обратного пьезоэффекта.

Применение эхо-импульсного метода ультразвукового контроля обусловлено простотой его реализации, отсутствием необходимости двухстороннего доступа к изделию, высокой чувствительностью ко внутренним дефектам и высокой разрешающей способностью.

Сущность эхо-метода состоит в излучении коротких импульсов упругих колебаний в контролируемое изделие и регистрации интенсивности (амплитуды), а также времени прихода эхосигналов, отраженных от дефектов. Временной интервал между зондирующим импульсом и эхо-импульсом пропорционален глубине залегания дефекта, а амплитуда – отражающей способности дефекта. Принцип работы эхо-метода изображен на рисунке 3. Признак обнаружения дефекта – появление в пределах зоны контроля (между зондирующим импульсом и донным сигналом) сигнала, отраженного от дефекта [3].

При использовании эхо-метода для обнаружения различно ориентированных (относительно нормали) дефектов применяются ПЭП с разными углами ввода ультразвука в контролируемый объект – от 42° до 70° (угол ввода задает призма преобразователя). Данный метод использует однокомпонентные преобразователи, т.е. преобразователи, в конструкции которых предусмотрен один пьезоэлемент. Таким образом, для качественной проверки всех сечений исследуемого объекта следует поочередно проводить контроль преобразователями с разными углами ввода, что увеличивает время дефектоскопирования.

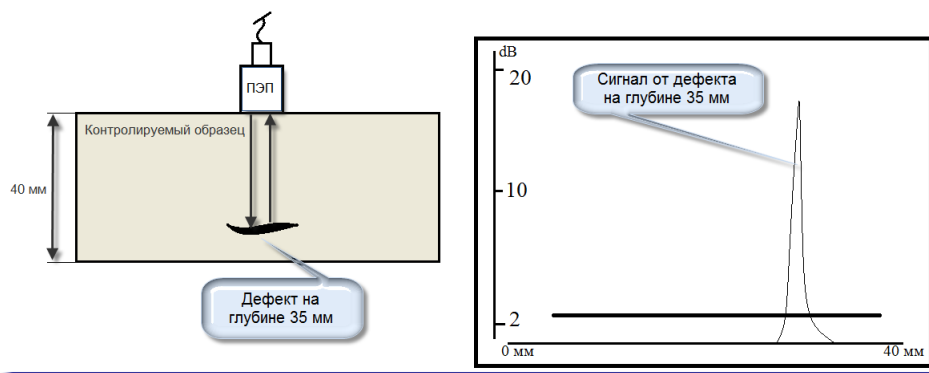


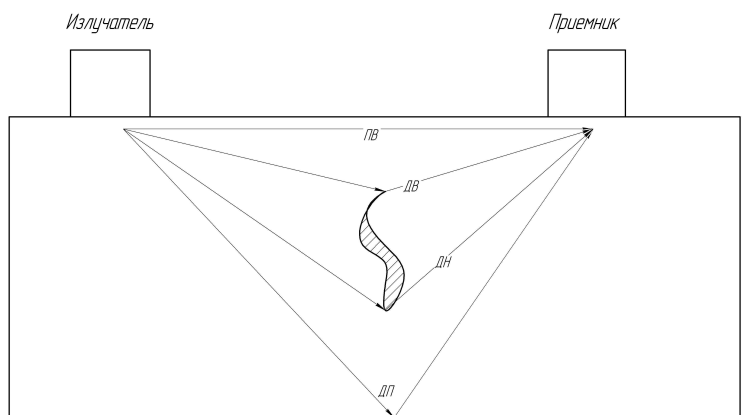
Рисунок 3. – Принцип работы эхо-метода

К преимуществам метода относятся высокие чувствительность и разрешающая способность, что наряду с возможностью точного определения координат и размеров дефекта делает данный метод одним из основных, используемых при контроле железнодорожных рельсов.

Главным недостатком эхо-метода является наличие мертвой зоны под излучателем. Наличие мертвой зоны связано с тем, что при близко расположенном к поверхности дефекте ввод ультразвуковых колебаний в момент прихода эхо-сигнала от дефекта еще продолжается.

Существуют и другие методы ультразвукового контроля, которые пока не нашли широкого применения в рельсовой дефектоскопии, однако считаются не менее перспективными в процессе обнаружения дефектов.

Таким, весьма прогрессивным, представляется дифракционно-временной метод, который обладает рядом преимуществ перед эхо-методом, однако не заменяет его, а является дополняющим. Принцип работы данного метода показан на рисунке 4.



Дифракционный сигнал от верхней грани дефекта (ДВ)

Дифракционный сигнал от нижней грани дефекта (ДН)

Поверхностная волна (ПВ)

Донная поверхность (ДП)

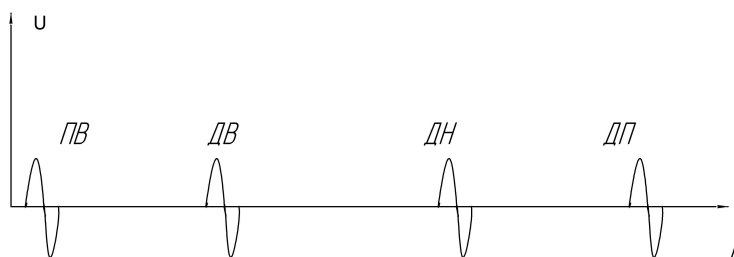


Рисунок 4. – Принцип работы дифракционно-временного метода

Метод реализован на двух преобразователях, включенных по отдельной схеме, и основан на явлении дифракции ультразвуковой волны на краях дефекта. Используя дифракционно-временной метод, обнаруживают и регистрируют как дифракционные волны, отраженные от краев дефекта, так и сигналы от донной поверхности, временное положение которых соответствует толщине анализируемого объекта. Кроме того, на приемник приходит поверхностная волна, которая при отсутствии поверхностных дефектов не испытывает искажений. При этом происходит определение места расположения дефекта и имеется возможность оценки его размеров.

Основной отличительной особенностью является практически полная независимость эффективности обнаружения дефекта от его ориентации (углового положения). Данное обстоятельство не только сокращает время контроля, но и повышает его эффективность.

К другим преимуществам относятся:

- возможность достижения более высокой точности при проведении измерений, составляющей, как правило, ± 1 мм, а при повторном обследовании $\pm 0,3$ мм;
- калибровка основана на времени прохождения пути дифракционных сигналов и не зависит от амплитуды сигнала;
- высокая производительность контроля, т.к. сканирование проводится вдоль одной линии с контролем всего объема шва [4].

Еще один метод, который по эффективности не только находится в одном ряду с вышеперечисленными, но по отдельным параметрам превосходит их – метод, использующий преобразователи в виде фазированных решеток.

Данный метод был разработан в 1959 г., однако вследствие отсутствия электронной техники, быстродействие которой позволило бы раскрыть все его возможности, до недавнего времени не использовался.



Рисунок 5. – Формирование фронта волны

Метод ультразвуковых фазированных решеток основан на преобразовании и генерировании ультразвуковых волн. Преобразователь (кристалл) решетки представляет собой множество пьезоэлектрических элементов, которые образуют линейные (решетка со множеством элементов, расположенных в один ряд) или матричные (решетка с элементами, расположенными по вертикали и горизонтали) структуры. Генератор задает последовательность импульсов с определенными задержками по фазе. Импульсы возбуждают группы пьезоэлементов, формирующих фронт волны. В результате на выходе получаем амплитудный сигнал в реальном времени, эквивалентный стандартному А-скану. В совокупности с высоким быстродействием данная технология позволяет реализовать метод, эффективность которого не зависит от ориентации дефекта. Принцип формирования фронта волны показан на рисунке 5.

Метод фазированных решеток не может полностью заменить классический эхо-метод ультразвукового контроля, являясь подтверждающим, а дефектоскопы, реализующие данный метод, имеют достаточно высокую стоимость.

Однако он относится к одним из наиболее перспективных методов ультразвукового контроля и обладает рядом преимуществ:

- различные углы ввода пучков могут быть сгенерированы с помощью одного преобразователя, что дает возможность одновременно сканировать гораздо большую область;
- большой охват увеличивает скорость сканирования объекта и разрешающую способность контроля;
- имеется возможность получения реальных изображений положения и размеров дефектов, что облегчает расшифровку и интерпретацию полученных результатов;
- все данные, учитывающие последовательность контроля, могут быть записаны в реальном времени [5].

Практическое выявление дефектов. На предприятиях Белорусской железной дороги используются дефектоскопы, работа которых основана на использовании эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии. Эффективность данного метода подтверждается на практике. Так, по результатам вторичного кон-

троля ручными преобразователями удастся выявлять дефекты на ранней стадии развития. Наглядным примером служит дефект кода 55 (трещины шейки рельса, возникшие в результате механического воздействия на рельс). Фрагмент дефектограммы данного дефекта приведен на рисунке 6.

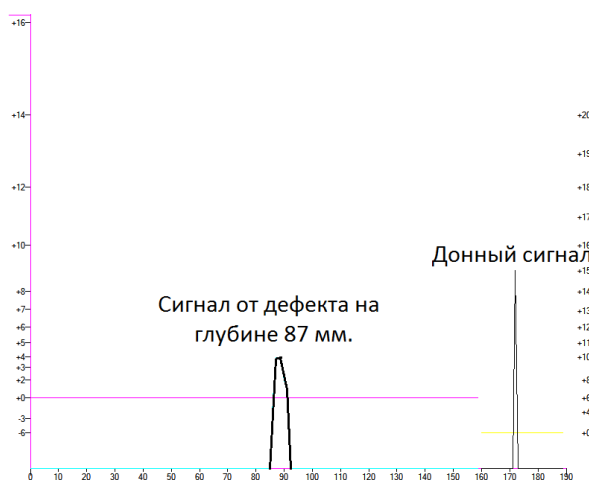


Рисунок 6. – Дефектограмма подозрительного сечения

Из дефектограммы следует, что дефект зарегистрирован первым каналом, реализованным на базе преобразователя с углом ввода ультразвука 0° с максимальной амплитудой на глубине 87 мм. Наряду с сигналом от первого канала можно наблюдать ослабление донного сигнала от 20 до 15 дБ в девятом информационном канале, реализующем зеркально-теневой метод. Объединив полученную информацию, можно сделать некоторые выводы:

- дефект развивается горизонтально, параллельно поверхности сканирования, т.к. сигнал зарегистрирован преобразователем с углом ввода ультразвука 0° ;
- дефект не полностью перекрывает проекцию шейки, т.к. присутствует часть донного сигнала в девятом канале;
- дефект располагается на глубине 87 мм от поверхности сканирования.

Данные обстоятельства свидетельствуют о наличии развивающегося дефекта V группы. При выезде на линию для проведения перепроверки подозрительного сечения был визуально подтвержден дефект, показанный на рисунке 7.

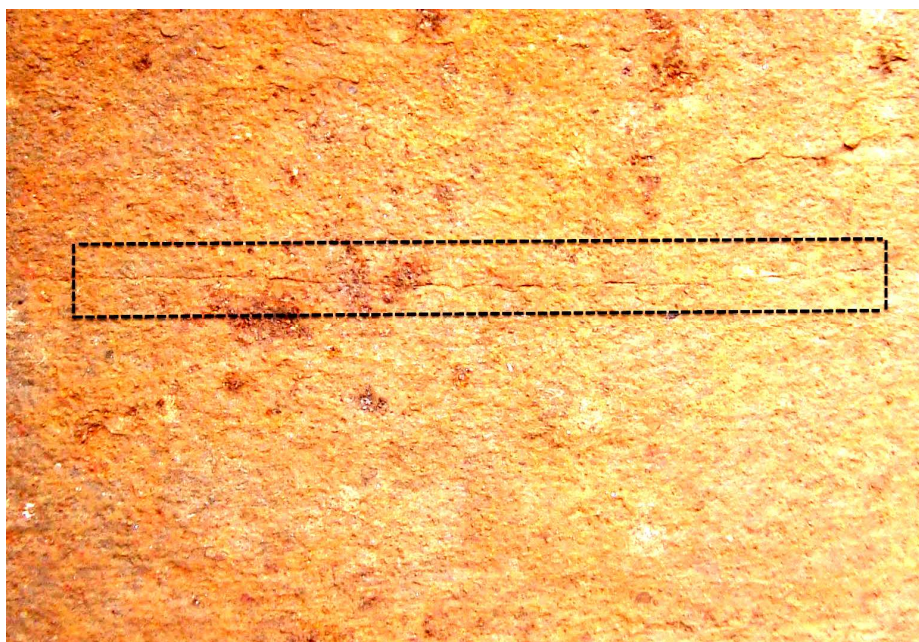


Рисунок 7. – Дефект шейки рельса

Вывод. Статистика распределения дефектов рельсов свидетельствует о большом количестве скрытых дефектов, которые по опасности проявления сопоставимы с внешними повреждениями поверхности, а в некоторых случаях даже превосходят их.

В связи с этим существует необходимость комплексного анализа дефектов не только при помощи стандартных ультразвуковых методов, но и с использованием перспективно развивающихся: дифракционно-временного метода и метода с использованием фазированных решеток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальная система подтверждения соответствия Республики Беларусь. Порядок декларирования соответствия продукции. Основные положения: НТД/ЦП 1-2-3-93. Классификация дефектов рельсов. Каталог дефектов рельсов. Признаки дефектных и остродефектных рельсов, 1993.
2. Марцинкевич, А.В. Ультразвуковой метод неразрушающего контроля : курс лекций / А.В. Марцинкевич ; ОАО «Белгорхимпром». – Минск, 2016. – 149 с.
3. Александрова, С.Б. Ультразвуковая дефектоскопия рельсов : учеб.-метод. комплекс / С.Б. Александрова ; Барановичский ЦППК Бел ЖД. – Барановичи, 2008. – 116 с.
4. Дифракционно-временной метод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tofd-pa.ru/tofd>. – Дата доступа: 01.08.2016.
5. Что такое фазированная решетка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://harfangveo.ru/static/faq>. – Дата доступа: 11.08.2016.

Поступила 20.09.2016

ULTRASONIC FLAW DETECTION OF THE RAILS

A. SHLIAHTENOK, D. DAUHALA

The article describes the most common by far echo-method of ultrasonic flaw detection, conducted analysis of a defects, that identified in 2015, are indicated specific reasons and peculiarities of their development, describes promising methods of ultrasonic flaw detection: time of flight diffraction (ToFD-method) and the method based on the converters in the form of phased Array, a practical example is described defect detection..

Keywords: *ultrasonic flaw detection, industrial diagnostic, ultrasonic probe, defects detection, nondestructive evaluation, echo-method, ultrasonic phase array, time of flight diffraction method.*