

УДК 681.586.773:624.072.233.5

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ\*

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

*Рассмотрена наиболее актуальная проблема рельсовой дефектоскопии – проблема обнаружения поперечных дефектов, находящихся под прикрытием горизонтальных расслоений. Проведен ультразвуковой контроль образцов железнодорожных рельсов, а также анализ информации, полученной в ходе испытаний образцов на гидравлическом прессе. На основании анализа полученных данных сформированы практические выводы и рекомендации, направленные на повышение эффективности контроля.*

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

Одной из наиболее острых проблем ультразвукового контроля рельсового пути является проблема выявления и определения параметров поперечных трещин (II группа), находящихся под прикрытием горизонтально-ориентированных дефектов головки рельса (I, III группы), которые, в отличие от дефектов V группы (дефекты шейки рельса), невозможно подтвердить визуально, если грани дефекта не вышли на поверхности головки рельса. Основной задачей при проведении контроля подобных сечений является выявление поперечных дефектов на стадии их начального развития.

Анализ изломов рельсов, произошедших на железнодорожных дорогах стран СНГ за 2017 год, показал, что в большинстве случаев, когда излом происходил из-за наличия поперечных трещин в головке рельса, ее поражение в поперечном сечении составляло не менее 50%. Данное обстоятельство указывает на необходимость более тщательного анализа сигналов, зарегистрированных дефектоскопом, а также выработки практических рекомендаций, упрощающих процесс контроля и повышающих его эффективность.

Для проведения контроля с последующим подтверждением его результатов путем долома отобрано 5 образцов рельсов. Первичный сплошной контроль проводился с использованием дефектоскопа УДС2-РДМ-22 со стандартной схемой прозвучивания. Цель данного этапа заключалась в получении дефектограмм сплошного контроля, на основании которых был осуществлен первичный анализ дефектных сечений.

В общем случае схемой прозвучивания (контроля) можно назвать группу датчиков, реализованных на базе конкретного дефектоскопа, которые обеспечивают наиболее эффективное выявление дефектов в соответствии с поставленными целями и задачами.

В дефектоскопах РДМ-22 для контроля всего объема головки рельса применяются следующие пьезоэлектрические преобразователи:

- Канал 1 – канал реализован посредством использования раздельно-совмещенного пьезоэлектрического преобразователя с углом ввода ультразвука в контролируемое изделие, равным  $0^\circ$ . На практике данный канал показывает высокую эффективность при выявлении различного рода горизонтальных расслоений и трещин. Зона контроля, в зависимости от типа рельса, составляет от 0 до 190 мм.

- Канал 2 (7) – пьезоэлектрические преобразователи с углом ввода  $70^\circ$ . Преобразователи развернуты вдоль продольной оси рельса по ходу движения ультразвукового дефектоскопа для 2-го канала, а также против движения дефектоскопа для 7-го канала. Практическая полезность данного канала заключается в возможности обнаружения трещин, развивающихся под протяженными горизонтальными расслоениями, которые, в силу особенностей отражения ультразвуковых волн от различно ориентированных поверхностей, невозможно выявить пьезоэлектрическими преобразователями с другими углами ввода. Канал 2 уверенно выявляет трещины, развивающиеся под углом  $18...20^\circ$  от нормали. Зона контроля, в зависимости от типа рельса, составляет от 3 до 45 мм. Основным недостатком данного преобразователя является наибольшая среди всех используемых в дефектоскопе РДМ-22 зависимость размеров, снятых с дефектного места, от температуры. Так, например, в диапазоне температур от минус 40 до плюс  $50^\circ\text{C}$  номинальный угол ввода изменяется от  $60^\circ$  до  $74^\circ$ . Изменение угла ввода до  $74^\circ$  приводит к образованию поверхностной волны, которая чувствительна даже к небольшим поверхностным дефектам.

\* Начало статьи опубликовано в журнале «Вестник Полоцкого государственного университета». – 2016. – № 12 – С. 64–70.

• Каналы 3, 6 и 8 – пьезоэлектрические преобразователи с углом ввода  $55^\circ$ , развернутые на  $34^\circ$  относительно продольной оси рельса и направленные:

- канал 3 – в рабочую грань против хода ультразвукового дефектоскопа;
- канал 6 – в рабочую грань по ходу движения дефектоскопа;
- канал 8 – в нерабочую грань против хода ультразвукового дефектоскопа.

Разворот вставок на  $34^\circ$  позволяет контролировать весь объем головки рельса. Единственным недостатком рассматриваемых пьезоэлектрических преобразователей является высокая чувствительность к поверхностным дефектам. В отдельных случаях, даже при небольших и неглубоких расслоениях, вследствие многократного переотражения ультразвуковой волны (УЗВ) между расслоением и поверхностью, оператор может выдать ложное заключение о наличии дефекта в рельсе. Зона контроля данных пьезоэлектрических преобразователей составляет 144 мм.

Пьезоэлектрические преобразователи с углом ввода  $55^\circ$ , развернутые на  $34^\circ$  относительно продольной оси рельса, реализуют схему «ЗМЕЙКА». Данная схема является наиболее сложной и с точки зрения процесса отражения ультразвуковых лучей от различных граней головки рельса, и для понимания принципа отображения сигналов на В-развертке. Это вызвано тем, что для обнаружения дефектов головки в основном используются одно-, двух- и трехкратно переотраженные от ее граней лучи [1].

Вторичный, уточняющий, контроль отобранных образцов проводился при помощи портативных дефектоскопов УДС2-РДМ-33, УДС2М-35 с использованием различных методов, основанных на раздельной и совмещенной схемах включения. Наибольший интерес представляет раздельная схема контроля, не включенная в перечень обязательных, однако обладающая высокой выявляющей способностью. Принцип работы различных схем включения приведен на рисунке 1.

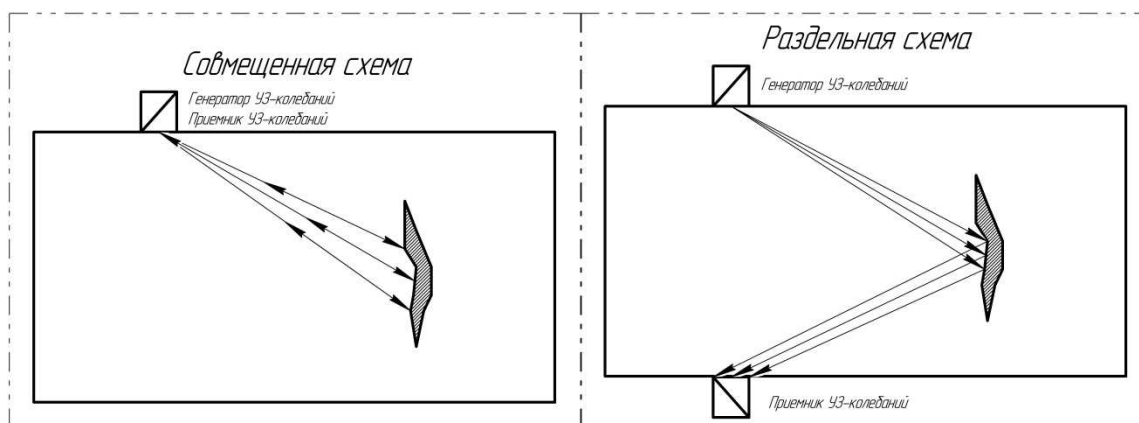


Рисунок 1. – Принцип работы различных схем включения

На первом этапе проведен анализ фрагментов дефектограмм дефектоскопа УДС2-РДМ-22, эскизы которых приведены на рисунке 2, и определены все сигналы, зарегистрированные ультразвуковыми датчиками.

Образец № 1:

- протяженность поверхностного расслоения по итогам измерения разрыва донного сигнала составляет 65 мм;
- максимальная глубина расслоения по итогам измерения сигналов, зарегистрированных 1-м каналом, составляет 7 мм;
- до разрыва донного сигнала 2-м каналом зарегистрирован сигнал в диапазоне 10...25 мм;
- каналами 3, 6 и 8 зарегистрированы сигналы в конце средней зоны (58...60 мм).

Исходя из результатов анализа сигналов, зарегистрированных 2-м каналом, можно предположить, что дефект имеет определенный наклон относительно нормали и располагается в центре головки рельса под горизонтальным расслоением.

Сигналы в каналах 3, 6 и 8, временное положение которых соответствует концу средней – началу дальней зоны, могут быть обусловлены отражениями как от угла, образованного плоскостью предполагаемого дефекта и горизонтальным расслоением, так и от краев и неровностей самого расслоения. Учитывая эти обстоятельства, рассмотрение данных сигналов, явно указывающих на наличие дефекта (без возможности заранее увидеть поперечное сечение в месте долома), нецелесообразно. Лишь после испытания рельса на прессе и последующего анализа дефекта в поперечном сечении, можно с определенной долей уверенности провести анализ сигналов от данных каналов.

Образец № 2:

- протяженность поверхностного расслоения по итогам измерения разрыва донного сигнала составляет 69 мм;
- максимальная глубина расслоения по итогам измерения сигналов, зарегистрированных 1-м каналом, составляет 7...7,5 мм;
- до разрыва донного сигнала 2-м каналом зарегистрированы 2 пачки сигналов в диапазонах глубин 8...18 и 21...28 мм соответственно.

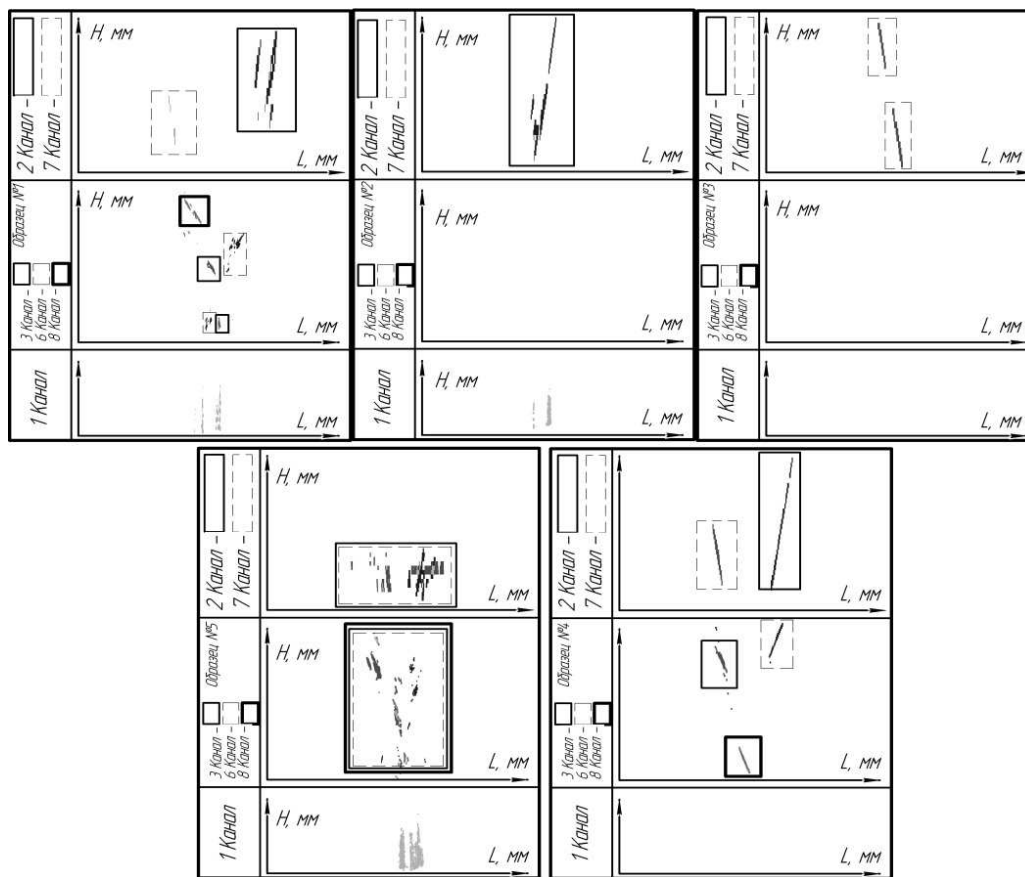


Рисунок 2. – Фрагменты дефектограмм пяти образцов рельсов

Исходя из результатов анализа сигналов, зарегистрированных 2-м каналом, можно предположить, что дефект имеет определенный наклон относительно нормали и располагается в центральной части головки рельса под горизонтальным расслоением.

Образец № 3:

- каналом 7 зарегистрированы 2 пачки сигналов в диапазонах глубин 10...19 и 25...32 мм соответственно.

Это обстоятельство указывает на возможный дефект сварного шва, расположенный в центральной части головки рельса.

Образец № 4:

- каналом 2 зарегистрирован сигнал с максимальной амплитудой на глубине 10...36 мм;
- каналом 7 зарегистрирован сигнал в диапазоне 11...23 мм;
- каналом 3 зарегистрирован сигнал в диапазоне глубин 101...115 мм с максимальной амплитудой на глубине 108 мм;
- каналом 6 зарегистрирован сигнал в диапазоне глубин 109...126 мм с максимальной амплитудой на глубине 117 мм;
- каналом 8 зарегистрирован сигнал в диапазоне глубин 49...63 мм с максимальной амплитудой на глубине 56 мм.

Если отсутствует поверхностное повреждение, то по результатам анализа можно говорить о наличии в поперечном сечении развитого дефекта. Каналы 2 и 7 указывают на наличие отражателя

в центральной части головки рельса. Каналы 3, 6 и 8 регистрируют сигналы в дальней (3 и 6 каналы) и средней (8 канал) зонах, что указывает на наличие дефекта в центральной части и нерабочей грани головки рельса.

Образец № 5:

- протяженность поверхностного расслоения по итогам измерения разрыва донного сигнала составляет 81 мм;
- максимальная глубина расслоения по итогам измерения сигналов, зарегистрированных 1-м каналом, составляет 8 мм;
- сигналов от 2, 7, 3, 6 и 8-го каналов, явно указывающих на наличие дефекта, не зарегистрировано.
- дефект изъят из пути по коду 30Г.2 (горизонтальное расслоение головки рельса) в виду протяженности поверхностного расслоения.

На втором этапе все образцы рельсов контролировались дефектоскопами УДС2М-35 и УДС2-РДМ-33. Основные параметры дефектов, фиксируемые в процессе контроля, показаны на рисунке 3.

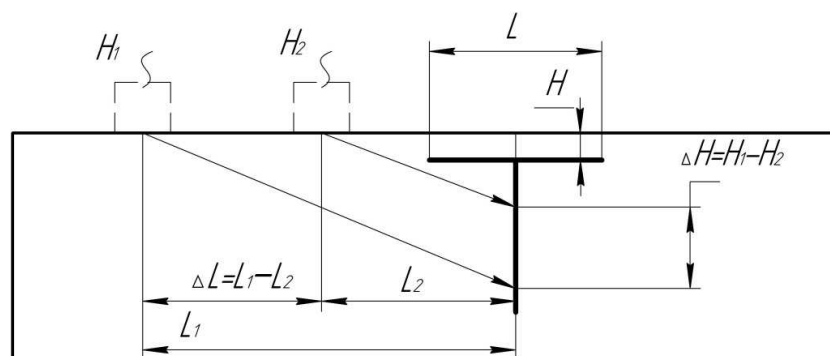


Рисунок 3. – Основные фиксируемые параметры дефектов

При использовании совмещенной схемы данные дефектоскопы показали практически идентичные результаты и подтвердили наличие поперечных дефектов в образцах с номерами 1...4.

Раздельная схема прозвучивания подтвердила наличие дефектов во всех образцах рельсов, причем в образце № 5 сигнал от предполагаемого дефекта появился лишь после подворота преобразователей на  $10^\circ$  относительно продольной оси.

Результаты контроля основных параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты контроля основных параметров

№ образца	Схема включения датчиков	Тип дефектоскопа	Угол ввода ультразвука, град	$H^*$ , мм	$L^{**}$ , мм	$\Delta H$ , мм	$\Delta L$ , мм	$\Delta X$ , мм
1	Совмещенная	УДС2М-35	70	7	65	23	27	27
	Раздельная	УДС2-РДМ-33	45	-	-	-	-	29
2	Совмещенная	УДС2М-35	70	7,5	69	16	21	21
	Раздельная	УДС2-РДМ-33	45	-	-	-	-	22
3	Совмещенная	УДС2М-35	70	-	-	28	12	27
	Раздельная	УДС2-РДМ-33	45	-	-	-	-	30
4	Совмещенная	УДС2М-35	70	-	-	27	15	38
	Раздельная	УДС2-РДМ-33	45	-	-	-	-	43
5	Совмещенная	УДС2М-35	70	8	81	-	-	-
	Раздельная	УДС2-РДМ-33	45	-	-	-	-	9

\* – параметр определяется при помощи преобразователя с углом ввода  $0^\circ$ ;

\*\* – параметр определяется путем измерения протяженности повреждения поверхности катания на основании данных, полученных при измерении параметра  $H$ .

На рисунке 4 представлены результаты контрольных доломов фрагментов рельсов.

Опираясь на информацию, опубликованную в [2, 3], касающуюся принципов регистрации сигналов от горизонтальных расслоений различной глубины и протяженности с использованием схемы «ЗМЕЙКА» ( $\alpha = 55^\circ$ ,  $\gamma = 34^\circ$ ), а также с учетом особенностей озвучивания различно ориентированных дефектов преобразователями с углом ввода  $70^\circ$ , при анализе фрагментов дефектограмм 16-ти коротко-

мерных рельсов, испытанных на гидравлическом прессе в 2015 году, а также 5-ти короткомерных рельсов, испытанных в 2016 году, установлено следующее:

1) даже при отсутствии под горизонтальным расслоением поперечных трещин на дефектограмме в каналах 3, 6 и 8 могут присутствовать сигналы, временное положение которых указывает на наличие дефекта II группы. Это обстоятельство обусловлено такими факторами, как отражение УЗ-волны от диффузных краев горизонтального расслоения, многократного отражения УЗ-волны в пределах границ «расслоение – поверхность катания», неровностями горизонтального расслоения и другими факторами;

2) при сравнении с дефектограммами предыдущих проходов данные сигналы могут присутствовать в тех же временных зонах на каждой из них;



Рисунок 4. – Результаты контрольных доломов рельсов

3) зона контроля 55-градусных преобразователей в схеме контроля дефектоскопа УДС2-РДМ-22 составляет 130 мм (ближняя зона – 14...38 мм, средняя зона – 39...70 мм, дальняя зона – 70...130 мм). Так как сигналы от горизонтальных расслоений находились в диапазоне глубин от 55 до 70 мм (в зависимости от глубины расслоения, типа рельса и его вертикального износа), а сигналы от дефектов, поражение головки которыми составило более 50%, были зарегистрированы на глубинах от 40 до 55...60 мм, можно сделать вывод о том, что в процессе анализа дефектограмм дефектных сечений, на которых присутствуют поверхностные повреждения, инженером по расшифровке в первую очередь должны рассматриваться сигналы, временное положение которых находится в диапазоне от 40 до 60 мм. Наличие сигнала в этой зоне может указывать на развитый поперечный дефект головки рельса;

4) на двухпутных участках, где движение поездов по каждому из путей производится преимущественно в одном направлении, характерно развитие поперечных дефектов головки рельса под углом (относительно нормали) в диапазоне, как правило, от 0° до 20° (следует отметить, что отклонение развитого дефекта от нормали в образце № 1 составило 39°, что является скорее исключением).

Особенность развития подобных дефектов заключается в том, что нижний край трещины направлен по ходу движения подвижного состава, навстречу движению съемным дефектоскопом. В этом случае затрудняется его регистрация схемой «ЗМЕЙКА» (возможно получение незначительных пачек сигналов, интенсивность которых будет минимальна). Наиболее продуктивно данные дефекты выявляются каналами 2 и 7 (схема прозвучивания УДС2-РДМ-22), когда УЗ-волна озвучивает плоскость поперечной трещины, к тому же чем больше наклон в диапазоне от 0° до 20°, тем эффективнее 70-градусные преобразователи регистрируют данный дефект.

Существуют два варианта регистрации подобных дефектов 70-градусными преобразователями, входящими в схему прозвучивания дефектоскопа УДС2-РДМ-22:

– в случае если поперечный дефект головки рельса не имеет или имеет незначительный наклон относительно нормали, а его плоскость преимущественно зеркальная относительно длины волны, то регистрация может иметь вид, изображенный на рисунке 5. Откуда видно, что 7-м каналом зарегистрировано 2 сигнала с максимумами на глубине 29 и 13 мм. В данном случае данные пачки сигналов отно-

сятся к одному дефекту, озвученному краями трещины. При этом уровень превышения сигналом порога срабатывания звуковой индикации может быть незначительным;

– при значительном отклонении плоскости дефекта от нормали она практически полностью озвучивается 70-градусным преобразователем, в результате чего на дефектограмме будет присутствовать значительная по протяженности пачка сигналов;

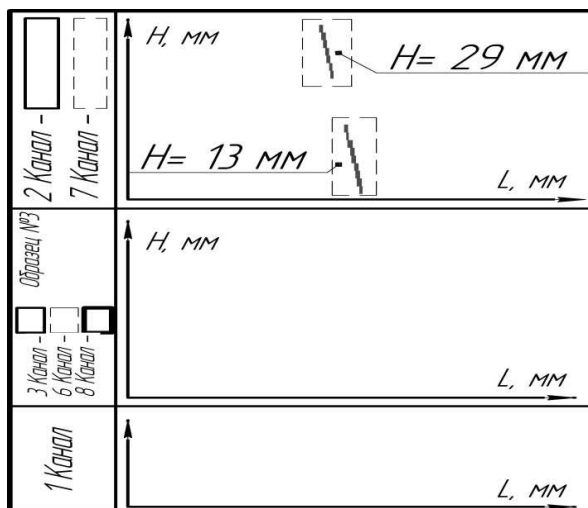


Рисунок 5. – Фрагмент дефектограммы дефекта сварного стыка

5) анализ сигналов, зарегистрированных 2-м каналом, необходимо производить в режиме «сведение». В первую очередь на вторичный контроль должны выдаваться дефектные места, в которых сигналы 70-градусными преобразователями зарегистрированы до пропадания донного сигнала (до поверхностного повреждения).

6) комплексный анализ дефектограмм как способ достоверного определения наличия поперечных дефектов головки рельса целесообразен в случаях отсутствия поверхностных повреждений.

При контроле образцов ультразвуковыми дефектоскопами УДС2-РДМ-33 и УДС2М-35 установлено:

– поперечные дефекты в образцах 1...4 зарегистрированы как преобразователями, включенными по раздельной схеме, так и преобразователями, включенными по совмещенной схеме;

– условные размеры дефектов, зарегистрированных по результатам контроля, зависят в первую очередь от качества настройки и типа конкретных факторов, таких как ориентация дефекта, профиль рельса в контролируемом сечении и т.д. Следует отметить, что результаты измерений в рамках проводимых испытаний с использованием различных дефектоскопов приблизительно совпадают и подтверждают наличие поперечных дефектов;

– одной из выявленных особенностей регистрации поперечных дефектов преобразователями с углом ввода  $70^\circ$  является то, что постановка данного преобразователя на границе горизонтального расслоения в отдельных случаях не исключает озвучивания поперечного дефекта, находящегося под этим расслоением, одним из фронтов УЗ-волны;

– исходя из результатов контроля образца № 2, имеющего боковой износ, равный 7 мм, можно сделать допущение о возможности использования зеркального метода (К-метода) как метода, позволяющего проводить контроль рельсов, имеющих боковой износ. В данном случае излучатель должен быть установлен со стороны, противоположной износу, а приемник – непосредственно на место износа. Данное допущение требует дальнейшего практического подтверждения в виду отсутствия обширной выборки по предложенному способу;

– с целью определения наиболее эффективных схем контроля и повышения его эффективности, для дефектоскопирования рельсов, пораженных дефектом кода 11.2 (выкрашивание металла боковой рабочей выкружки рельса), целесообразно экспериментальное (дополнительный проход) использование дефектоскопов УДС2-РДМ-22 с разворотом вставок каналов 2, 7 на  $10...14^\circ$  относительно продольной оси рельса в рабочую грань. Подтверждение наличия дефектов, обнаруженных данной схемой, необходимо проводить с использованием ручных преобразователей, включенных по различным схемам.

Ввиду того что использование преобразователей (как лыжных, так и ручных), включенных по совмещенной схеме, не дало результатов при контроле образца № 5, требуется проводить контроль

с использованием отдельных методов. Использование К-метода позволило выявить дефект II группы (поперечные трещины в головке рельса) на стадии зарождения. Особенностью использования данного метода при контроле образца № 5 является то, что сигнал от поперечного дефекта был получен при развороте преобразователей на угол, приблизительно равный  $10^\circ$ .

Результаты контроля образцов рельсов отражены в рекомендациях, которые выпущены в виде методического материала, используемого в ходе проведения технических занятий с операторами дефектоскопов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Довгяло, Д. А. Особенности и принципы выявления дефектов головки железнодорожного рельса / Д. А. Довгяло, А. В. Шляхтенюк // Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкого государственного университета. – 2016. – Выпуск 15 (85), Промышленность. Информационные технологии. Машиностроение. – С. 150–154.
2. Марков, А.А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов / А. А. Марков, Е. А. Кузнецова. – СПб. : Ультрапринт, 2014. – 332 с.
3. Александрова, С. Б. Ультразвуковая дефектоскопия : учеб.-метод. комплекс / С. Б. Александрова. – Барановичи : ДЦППК-2, 2008. – 205 с.

Поступила 20.09.2017

#### IMPROVEMENT OF METHODS FOR ULTRASOUND CONTROL

A. SHLIAHTENOK, D. DAUHALA

*The most actual problem of rail flaw detection – the problem of detecting transverse defects that propagates under the longitudinal spallings is considered. The ultrasonic testing of rails samples as well as analysis of the obtained data and control brakes of defective rails that aimed to confirm the results of the inspection have been carried out. Based on the analysis of the data obtained, practical conclusions and recommendations aimed to improving the effectiveness of control have been developed.*

**Keywords:** *ultrasonic flaw detection, industrial diagnostics, ultrasonic sensor, defect detection, nondestructive testing, echo method, ultrasonic phased arrays, diffraction-time method.*