

Визуализация изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог

А. Н. КИРЕЕВ^{1, 2}

¹ Публичное акционерное общество «Лугансктепловоз», Луганск, 91005, Украина

² Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», Луганск, 91034, Украина

Аннотация. В статье поставлена задача визуализации изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог эхо-импульсным методом одноканальным ультразвуковым дефектоскопом с применением различных методов дефектометрии. Визуализация дефектов осуществляется путем представления изображений дефектов на развертках типа В и С в автоматизированных и механизированных системах ультразвукового контроля. Представлен математический аппарат и алгоритм определения типа дефекта двухчастотным методом. Рассмотрены различные методы дефектометрии, на основе которых разработан программный продукт визуализации изображений дефектов NDTRT-14 при ручном ультразвуковом контроле элементов подвижного состава железных дорог. Представленный программный продукт успешно внедрен в технологический процесс ультразвукового контроля элементов экипажной части магистральных тепловозов в Публичном акционерном обществе «Лугансктепловоз».

Ключевые слова: неразрушающий контроль; ультразвуковой контроль; эхо-импульсный метод; дефектометрия; двухчастотный метод; визуализация

Введение. Методы неразрушающего контроля [1, 2, 3, 4] получили широкое распространение в различных отраслях народного хозяйства. Особое значение имеет их применение при изготовлении деталей и узлов подвижного состава железных дорог, поскольку методы неразрушающего контроля позволяют, не нарушая пригодности объекта к дальнейшему применению, производить 100% контроль показателей качества и надежности, непосредственно влияющих на безопасность движения.

Методы неразрушающего контроля используются как при проверке геометрических размеров изделий, так и при контроле структурных и физико-механических свойств материалов. Однако наибольшее распространение они получили при контроле элементов и систем подвижного состава на отсутствие недопустимых несплошностей (дефектов).

Анализ проблемы и постановка задачи. При контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог на отсутствие поверхностных и подповерхностных дефектов наибольшее распространение по-

лучили такие виды неразрушающего контроля, как визуально-оптический, магнитный, вихретоковый, капиллярный, электрический.

Для контроля деталей и узлов подвижного состава на отсутствие внутренних дефектов применяются радиационный и акустический виды неразрушающего контроля.

Использование радиационного неразрушающего контроля ограничено сравнительно малой толщиной контролируемых изделий, большими габаритами контрольной аппаратуры, необходимостью обеспечения защиты персонала от вредного воздействия ионизирующего излучения.

Для контроля деталей и узлов подвижного состава железных дорог на отсутствие внутренних дефектов преимущественно применяются акустические методы неразрушающего контроля.

Акустические методы неразрушающего контроля [5, 6, 7, 8] основаны на использовании упругих колебаний и волн, возбуждаемых или возникающих в контролируемом объекте. Известно множество акустических методов контроля, каждый из которых имеет свою область применения. Наиболее распространенным методом акустического неразрушающего контроля на отсутствие внутренних дефектов в металлических объектах является ультразвуковой эхо-импульсный метод.

Цель научного исследования — разработка способа визуализации изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог эхо-импульсным методом.

Визуализация изображений дефектов. Основная часть. При ручном ультразвуковом контроле эхо-импульсным методом используются одноканальные импульсные дефектоскопы [9] (рис. 1). Представление информации о наличии в объекте контроля дефектов осуществляется путем представления эхо-сигналов на развертке типа А, на которой по вертикали отображается амплитудная характеристика эхо-сигнала, а по горизонтали — расстояние до отражателя или время прихода акустического импульса (А-скан).

■ E-mail: lifter_23@mail.ru (А. Н. Киреев)



Рис. 1. Ультразвуковые импульсные дефектоскопы (слева направо): УД 4-76, УД 3-71, УД 2-70
Fig 1. Ultrasonic pulse flaw detectors (from left to right): UD 4-76, UD 3-71, UD 2-70

Классификация несплошности как допустимой или как дефекта осуществляется путем сравнения амплитудной характеристики эхо-сигнала от несплошности с амплитудной характеристикой эхо-сигнала от эталонного отражателя в стандартном образце. Однако применение А-скана не позволяет получить информацию о форме и размерах обнаруженной несплошности.

Для повышения информативности результатов ультразвукового контроля используются методы визуализации дефектов с применением разверток типа В (В-скан) и С (С-скан). Развертка типа В — изображение несплошностей в поперечном сечении объекта контроля, перпендикулярном поверхности ввода ультразвуковой волны и параллельном направлению распространения ультразвуковой волны. Развертка типа С — отображение проекции контролируемого объема изделия на поверхность ввода ультразвуковой волны в некотором масштабе.

Для построения В- и С-сканов необходимо использование многоканальных дефектоскопов с применением нескольких преобразователей, сканирующих с разных плоскостей, или дополнительных устройств, таких как датчик перемещения.

Однако применение многоканальных дефектоскопов возможно только в автоматизированных или механизированных системах неразрушающего контроля, а использование датчика перемещения ограничено возможностью сканирования поверхности контроля только по прямой к датчику, и с его помощью возможно построение только В-скана, что не дает полной информации о форме и размере дефекта.

Для визуализации изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле при применении одноканальных ультразвуковых дефектоскопов целесообразно применение методов ультразвуковой дефектотрии — получения информации о форме и размерах дефекта.

В работах [10, 11, 12, 13] предлагается двухчастотный метод дефектотрии, позволяющий определить тип (форму) как точечного, так и протяженного дефекта —

объемный или плоскостной, при ручном ультразвуковом контроле.

Метод основан на измерении амплитудной характеристики эхо-сигналов от дефекта на частотах ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц и амплитудных характеристик донных эхо-сигналов на тех же частотах, расчете коэффициента формы дефекта и сравнении его с граничными значениями, одно из которых соответствует идеально объемному дефекту, другое — идеально плоскостному.

Коэффициент формы дефекта определяется из выражения:

$$v = N_{\text{деф}2,5} - N_{\text{деф}5,0} + N_{\text{д}2,5} - N_{\text{д}5,0}, \quad (1)$$

где $N_{\text{деф}2,5}$, $N_{\text{деф}5,0}$ — амплитудные характеристики эхо-сигналов от дефекта на частотах ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц соответственно, дБ; $N_{\text{д}2,5}$, $N_{\text{д}5,0}$ — амплитудные характеристики донных эхо-сигналов на частотах ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц соответственно, дБ.

Граничное значение для идеального точечного плоскостного дефекта (модель дефекта — плоскодонный цилиндрический отражатель) определяется из выражения (2):

$$v_{\text{пл.т.}} = 20 \lg \left(\frac{\lambda_{5,0}^2 \cdot S_{\text{д}2,5}}{\lambda_{2,5}^2 \cdot S_{\text{д}5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2,5} \cdot S_{\text{д}5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{\text{д}2,5}} \right)^{\frac{x}{x_{\text{д}}}} \right), \quad (2)$$

где $\lambda_{2,5}$, $\lambda_{5,0}$ — длина ультразвуковой волны на частоте 2,5 и 5,0 МГц соответственно, мм; $S_{\text{д}2,5}$, $S_{\text{д}5,0}$ — площадь пьезоэлектрического преобразователя с частотой 2,5 и 5,0 МГц соответственно, мм²; x — расстояние от поверхности ввода ультразвука до дефекта, мм; $x_{\text{д}}$ — расстояние от поверхности ввода ультразвука до донной поверхности, мм.

Граничное значение для идеального точечного объемного дефекта (модель дефекта — полусферический отражатель) определяется из выражения:

$$v_{об.т.} = 20lg \left(\frac{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}{\lambda_{2,5} \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2,5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}} \right)^{\frac{x}{x_d}} \right). \quad (3)$$

Граничное значение для идеального протяженного плоскостного дефекта (модель дефекта — паз с плоским дном) определяется из выражения:

$$v_{пл.пр.} = 20lg \left(\frac{\sqrt{\lambda_{5,0}^3 \cdot S_{a2,5}}}{\sqrt{\lambda_{2,5}^3 \cdot S_{a5,0}}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2,5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}} \right)^{\frac{x}{x_d}} \right). \quad (4)$$

Граничное значение для идеального протяженного объемного дефекта (модель дефекта — боковой цилиндрический отражатель) определяется из выражения:

$$v_{об.пр.} = 20lg \left(\frac{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}{\lambda_{2,5} \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2,5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}} \right)^{\frac{x}{x_d}} \right). \quad (5)$$

При определении типа дефекта устанавливается доверительный интервал между значением коэффициента формы и граничными значениями объемных и плоскостных дефектов, равный 30 %, т. е.:

дефект считается плоскостным, если выполняется условие:

$$v \leq \text{ГПД} + 0,3|\text{ГОД} - \text{ГПД}|, \quad (6)$$

где ГПД — граничное значение плоскостного дефекта, для точечного дефекта — $v_{пл.т.}$, для протяженного дефекта — $v_{пл.пр.}$; ГОД — граничное значение объемного дефекта, для точечного дефекта — $v_{об.т.}$, для протяженного дефекта — $v_{об.пр.}$;

дефект считается объемным, если выполняется условие:

$$v \geq \text{ГОД} - 0,3|\text{ГОД} - \text{ГПД}|; \quad (7)$$

в противном случае дефект не является плоскостным, однако и не является идеально объемным.

В работах [11, 14] предложен метод определения эквивалентных размеров дефектов различного типа. Эквивалентный диаметр точечного плоскостного дефекта:

$$d_{пл.т.} = \frac{2\lambda x 10^{N/40}}{\left(\frac{2\lambda x_d 10^{N_d/20}}{S_a} \right)^{\frac{x}{2x_d}} \sqrt{S_a \pi}}, \quad (8)$$

где λ — длина ультразвуковой волны, мм; N — амплитудная характеристика эхо-сигнала от дефекта, дБ; N_d — амплитудная характеристика донного эхо-сигнала, дБ; S_a — площадь пьезоэлектрического преобразователя, мм².

Эквивалентный диаметр точечного объемного дефекта:

$$d_{об.т.} = \frac{4\lambda x^2 10^{N/20}}{S_a \cdot \left(\frac{2\lambda x_d 10^{N_d/20}}{S_a} \right)^{\frac{x}{x_d}} - 2\lambda x 10^{N/20}}. \quad (9)$$

Эквивалентный поперечный размер протяженного плоскостного дефекта:

$$L_{пр.пл.} = \frac{10^{N/20} \sqrt{2(\lambda x)^3}}{S_a \cdot \left(\frac{2\lambda x_d 10^{N_d/20}}{S_a} \right)^{\frac{x}{x_d}}}. \quad (10)$$

Эквивалентный поперечный размер протяженного объемного дефекта:

$$d_{пр.об.} = \frac{8x^3 \lambda^2 10^{N/10}}{S_a^2 \cdot \left(\frac{2\lambda x_d 10^{N_d/20}}{S_a} \right)^{\frac{2x}{x_d}} - 4x^2 \lambda^2 10^{N/10}}. \quad (11)$$

Представленные методы дефектометрии позволяют определить тип обнаруженного в процессе ультразвукового контроля эхо-импульсным методом несплошности, и по результатам определения типа рассчитать эквивалентный размер соответствующего дефекта.

Для визуализации изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле деталей и узлов эхо-импульсным методом был разработан программный продукт NDTRT-14, позволяющий получить В- и С-сканы контролируемого участка объекта. Окна программного продукта NDTRT-14 представлены на рис. 2, 3, 4. Сначала одним из известных методов определяется тип дефекта, затем с помощью программного продукта производится его визуализация с определением эквивалентного размера дефекта. Метод определения эквивалентного размера дефекта интегрирован в программный продукт.

Визуализация изображений дефектов посредством представления В- и С-сканов контролируемого участка объекта контроля при помощи программного продукта NDTRT-14 осуществляется следующим образом:

- в окно «Ввод данных» поступают данные: координаты контролируемого участка изделия; диаметр пьезоэлектрического преобразователя; частота ультразвуковой волны; скорость ультразвуковой волны в объекте контроля; расстояние от поверхности ввода ультразвуковой волны до донной поверхности; расстояния от поверхности ввода ультразвуковой волны до дефектов; амплитудная характеристика донного эхо-сигнала на бездефектном участке объекта контроля; амплитудные характеристики эхо-сигналов от дефектов; координаты дефектов;



Рис. 2. Стартовое окно программного продукта NDTRT-14
Fig. 2. The start window of the software product NDTRT-14

Координаты контролируемого участка					
верх					
Координата Z	0	110	220	330	440
Координата Y	45	67	75	67	45
низ					
Координата Z	0	110	220	330	440
Координата Y	0	22	30	22	0
лево					
Координата Z	0	0	0	0	0
Координата Y	0	11,25	22,5	11,25	45
право					
Координата Z	440	440	440	440	440
Координата Y	0	11,25	22,5	11,25	45

Параметры ПЭП			
Диаметр ПЭП d, мм	12	Sa, мм²	113,0973
Частота УЗ волны f, Гц	2500000		

Параметры ОК			
Скорость УЗ волны в ОК, мм/с	5850000		
Длина УЗ волны λ, мм	2,34		

Измеренные характеристики			
Расстояние до донной пов-ти Хд, мм	110		
Амплитуда донного эхо-сигнала Nd, дБ	-25		



Параметры обнаруженных несплошностей					
Точечные несплошности					
Плоскостная несплошность					
Изм. хар-ки		Расч. данные		Координаты	
N, дБ	-32	Экв. размер Dпл, мм		Zн, мм	120
X, мм	70	4,249591377		Yн, мм	30
Объемная несплошность					
Изм. хар-ки		Расч. данные		Координаты	
N, дБ	-38	Экв. размер Dоб, мм		Zн, мм	350
X, мм	55	6,603507915		Yн, мм	39
Протяженные несплошности					
Плоскостная несплошность					
Амплитуда N, дБ	-16	-15	-17	-14	-15
Расстояние до неспл. X, мм	60,5	61	61	60,5	61
Zн, мм	10	20	30	40	50
Yн, мм	20	22	24	26	28
Экв. попер. размер Lb, мм	7,063453	8,07363	6,413112	8,892361	7,925325
Y1	23,53173	26,03681	27,20656	30,44618	31,96266
Y2	16,46827	17,96319	20,79344	21,55382	24,03734
Объемная несплошность					
Амплитуда N, дБ	-16	-16,5	-16	-16,5	-16
Расстояние до неспл. X, мм	35	35	35,5	35,5	35,5
Zн, мм	160	170	180	190	200
Yн, мм	50	48	46	46	46
Экв. попер. размер D, мм	10,03749	8,808567	10,66804	9,355042	10,03749
Y1	55,01875	52,40428	51,33402	50,67752	51,01875
Y2	44,98125	43,59572	40,66598	41,32248	40,98125

▶ N\ NDTRT-14 \ Ввод данных / Визуализация /

Рис. 3. Окно «Ввод данных» программного продукта NDTRT-14
Fig. 3. The "Data Entry" window of the software product NDTRT-14

• в окне «Визуализация» выводятся С- и В-сканы контролируемого участка изделия. Красным цветом обозначается точечный плоскостной дефект, голубым — точечный объемный дефект, зеленым — протяженный объемный дефект и лиловым — протяженный плоскостной дефект.

Выводы. 1. Показано, что для визуализации изображений дефектов при ультразвуковом контроле эхо-импульсным методом необходимо построение В- и С-сканов контролируемого участка объекта.

2. Построение В- и С-сканов при ручном ультразвуковом контроле одноканальным ультразвуковым дефектоскопом не представляется возможным.

3. Рассмотрены методы дефектометрии, позволяющие определить тип и эквивалентный размер обнаруженного в процессе ручного ультразвукового контроля эхо-импульсным методом дефекта.

4. Разработан программный продукт NDTRT-14, позволяющий с применением методов дефектометрии получить визуальное изображение дефектов посредством представления В- и С-сканов контролируемого участка объекта контроля при ручном ультразвуковом контроле одноканальным дефектоскопом эхо-импульсным методом.

5. Представленные методы дефектометрии и программный продукт могут применяться при ультразвуковом контроле деталей экипажной части подвижного состава, имеющих плоскопараллельные поверхности ввода ультразвука и донную поверхность, например: бандажей колесных пар тягового подвижного состава

(контроль основного сечения с внутренней боковой поверхности), цельнокатанные колеса вагонов и локомотивов (контроль обода и ступицы в осевом направлении), катанные колесные центры тягового подвижного состава (контроль обода и ступицы в осевом направлении), заготовки ведомых и ведущих зубчатых колес тягового редуктора (контроль в осевом направлении) и др.

6. Экспериментальные исследования достоверности предложенного метода визуализации рассмотрены в работе [11].

7. Ультразвуковой контроль деталей и узлов подвижного состава железных дорог осуществляет персонал, сертифицированный на 1, 2 и 3 уровни квалификации. Заключение по результатам контроля выдает персонал, сертифицированный на 2 и 3 уровни квал-

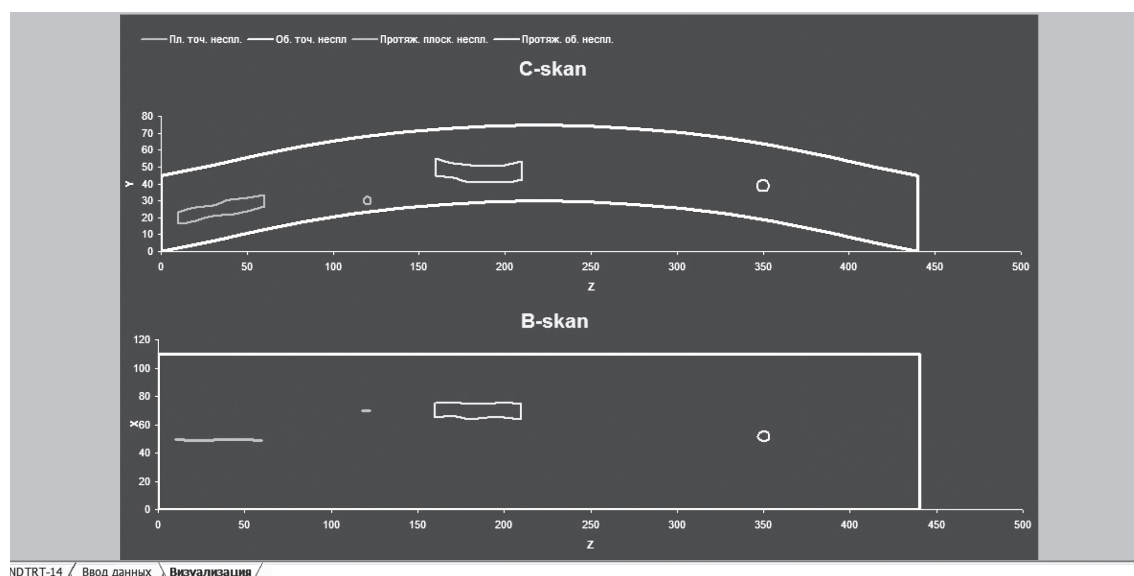


Рис. 4. Окно «Визуализация» программного продукта NDTRT-14
Fig. 4. Window "Visualization" of the software product NDTRT-14

лификации. При необходимости к официальному заключению по результатам контроля прикладываются С- и В-сканы дефектного участка, полученные с помощью программного продукта.

8. Разработанный программный продукт NDTRT-14 внедрен в технологический процесс ультразвукового контроля деталей экипажной части магистральных тепловозов в Публичном акционерном обществе «Лугансктепловоз».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов И.Н., Останин Ю.Д. Методы и средства неразрушающего контроля качества. М.: Высшая школа, 1988. 368 с.
2. Каневский И.М., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие. Владивосток. ДВГТУ, 2007. 243 с.
3. ГОСТ Р 56542–2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: Стандартинформ, 2015. 11 с.
4. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник. Изд. 2-е перераб. и доп. / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
5. Методы акустического контроля металлов / Н.П. Алешин [и др.]. М.: Машиностроение, 1989. 456 с.
6. Kireev A. Analysis of the ultrasonic control system at making of elements and knots of rolling stock of railways // TEKA. Commission of Motorization and Power Industry in agriculture. Lublin – Lugansk, 2010. Vol. 10C. P. 110–115.
7. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: справочник / пер. с нем. Е.К. Бухман, Л.С. Зенковой; под ред. В.Н. Волченко. М.: Металлургия, 1991. 752 с.
8. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела: пер. с англ. М.: Наука, 1972. 340 с.

9. Троицкий В.А. Ультразвуковой контроль. Дефектоскопы, нормативные документы, стандарты по УЗК. Киев: Феникс, 2006. 224 с.

10. Kireev A., Kirichenko I. Perfection of methods of determination of type of defect at the ultrasonic control of elements of rolling stock of railways // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin – Lugansk, 2012. Vol. 12. № 3. P. 58–61.

11. Киреев А.Н. Дефектометрия при ультразвуковом диагностировании элементов и систем подвижного состава железных дорог. Монография. Луганск: Ноулидж, 2016. 147 с.

12. Киреев А.Н. Дефектометрия при ручном контроле элементов и систем подвижного состава железных дорог ультразвуковым эхо-методом // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 2 (58). С. 24–30.

13. Киреев А.Н. Экспериментальные исследования метода дефектоскопии при ручном ультразвуковом контроле элементов подвижного состава железных дорог // В мире НК. 2015. Т. 18. № 4. С. 72–75.

14. Киреев А.Н. Метод определения эквивалентного размера несплошности при ультразвуковом диагностировании элементов и систем подвижного состава железных дорог // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 4 (60). С. 14–21.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

КИРЕЕВ Андрей Николаевич,
канд. техн. наук, начальник центральной заводской лаборатории ПАО «Лугансктепловоз»; доцент кафедры железнодорожного транспорта ГОУ ВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля»

Статья поступила в редакцию 13.01.2017 г., актуализирована 27.04.2017 г., принята к публикации 11.05.2017 г.

Visualization of defects images during manual ultrasonic inspection of parts and units of the railway rolling stock

A. N. KIREEV^{1,2}

¹ Public Joint Stock Company "Luganskteplovoy", Lugansk, 91005, Ukraine

² State institution of higher professional education "Luhansk National University n.a. Vladimir Dal'", Lugansk, 91034, Ukraine

Abstract. The article suggests a method for visualizing internal defects of parts and units of rolling stock, which is performed by representing defects images on type B and C scans in automated and mechanized ultrasonic testing systems. Methods of defectometry for manual ultrasonic testing by the echo impulse method are considered. Author presents the mathematical apparatus and the algorithm for determining the defect type by a two-frequency defectometry method. A mathematical apparatus and an algorithm are proposed for determining the equivalent sizes of defects of various types, such as point volume and planar defects and extended volume and planar defects. First, the types of defects are determined by a two-frequency method, then using the obtained data and mathematical transformations they are formed and displayed in the output window of the B- and C-scans of the monitored section.

Work on the formation of the image of defects is carried out automatically with the help of the NDTRT-14 software developed by the author. The presented methods of defectometry and the software product can be used for ultrasonic inspection of the parts of the carriage section of the rolling stock having a plane-parallel ultrasonic input surface and the bottom surface – treads of wheel-sets of the traction rolling stock (control of the main section from the inner side surface), solid-rolled wheels of cars and locomotives (wheels' rim and hub control in the axial direction), rolled wheel centers of traction rolling stock (wheels' rim and hub control in the axial direction), preforms of the driven and driving gears of the traction reducer (control in the axial direction). The software product was successfully introduced into the technological process of ultrasonic control of the elements of the carriage section of the mainline diesel locomotives in the Public Joint Stock Company "Luganskteplovoy".

Keywords: non-destructive control; ultrasonic control; echo impulse method; defectometry; two-frequency method; visualization

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-159-164>

REFERENCES

1. Ermolov I. N., Ostanin Yu. D. *Metody i sredstva nerazrushayushhego kontrolya kachestva* [Methods and means of non-destructive quality control]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, 368 p.
2. Kanevskiy I. M., Sal'nikova E. N. *Nerazrushayushchie metody kontrolya: uchebnoe posobie* [Nondestructive testing methods: Textbook]. Vladivostok, DVGUT Publ., 2007, 243 p.
3. GOST R 56542–2015. *Non-destructive testing. Classification of types and methods*. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 11 p. (in Russ.).
4. Klyuev V. V. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika: spravochnik*. Izd. 2-e pererab. i dop. [Nondestructive testing and diagnostics: a reference book. Ed. 2-nd revised and enlarged]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2003, 656 p.
5. Aleshin N. P., Belyy V. E., Vopilkin A. Kh., Voshchanov A. K., Ermolov I. N., Gurvich A. K. *Metody akusticheskogo kontrolya*

metallov [Methods of acoustic control of metals]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989, 456 p.

6. Kireev A. N. *Analysis of the ultrasonic control system at making of elements and knots of rolling stock of railways*. TEKA. Commission of Motorization and Power Industry in agriculture. Lublin – Lugansk, 2010, Vol. 10, pp. 110–115.

7. Volchenko V. N., Krautkremer Y., Krautkremer G. *Ul'trazvukovoy kontrol' materialov: spravochnik* [Ultrasonic inspection of materials. Reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991, 752 p.

8. Truell R., El'baum Ch., Chik B. *Ul'trazvukovye metody v fizike tverdogo tela* [Ultrasonic methods in solid state physics]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 340 p.

9. Troitskiy V. A. *Ul'trazvukovoy kontrol'. Defektoskopy, normativnye dokumenty, standarty po UZK* [Ultrasonic inspection. Defectoscopes, normative documents, UZK standards]. Kiev, Feniks Publ., 2006, 224 p.

10. Kireev A., Kirichenko I. *Perfection of methods of determination of type of defect at the ultrasonic control of elements of rolling stock of railways*. TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin – Lugansk, 2012, Vol. 12, no. 3, pp. 58–61.

11. Kireev A. N. *Defektometriya pri ul'trazvukovom diagnostirovani elementov i sistem podvizhnogo sostava zheleznnykh dorog* [Defectometry in the ultrasonic diagnosis of elements and systems of rolling stock of railways]. Lugansk, Knowledge Publ., 2016, 147 p.

12. Kireev A. N. *Defektometriya pri ruchnom kontrole elementov i sistem podvizhnogo sostava zheleznnykh dorog ul'trazvukovym ekho-metodom* [Defectometry with manual control of railway rolling stock elements and systems by ultrasonic echo method]. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, 2015, no. 2 (58), pp. 24–30.

13. Kireev A. N. *Eksperimental'nye issledovaniya metoda defektoskopii pri ruchnom ul'trazvukovom kontrole elementov podvizhnogo sostava zheleznnykh dorog* [Experimental researches of a method of flaw detection at manual ultrasonic control of elements of railway rolling stock]. V mire NK, 2015, Vol. 18, no. 4, pp. 72–75.

14. Kireev A. N. *Metod opredeleniya ekvivalentnogo razmera nesploshnosti pri ul'trazvukovom diagnostirovani elementov i sistem podvizhnogo sostava zheleznnykh dorog* [Method for determining the equivalent size of the discontinuity in the ultrasonic diagnosis of elements and systems of railroad rolling stock]. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, 2015, no. 4 (60), pp. 14–21.

ABOUT THE AUTHOR

Andrey N. KIREEV,

Cand. Sci. (Eng.), Head of Central Factory Laboratory of PJSC "Luganskteplovoy"; Associate Professor of the Department of Railway Transport of GOU VPO "Lugansk National University n.a. Vladimir Dal'"

Received 13.01.2017

Revised 27.04.2017

Accepted 11.05.2017

■ E-mail: lifter_23@mail.ru (A. N. Kireev)