

УДК 620.179.16

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-46-56

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ТРЕЩИН В ГОЛОВКЕ РЕЛЬСА

А. А. Марков, доктор технических наук, ОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург, Россия

Г. А. Иванов, магистрант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

Приводятся результаты исследований способа обнаружения продольных трещин ультразвуковыми волнами в головке рельса. В современных рельсах до 80 % дефектов головки рельсов – продольные трещины. Совместный анализ эхосигналов от нижней выкружки и эхосигналов от поверхностей трещины, а также огибающей углового сигнала позволяет сформировать образ дефекта и оценить качество акустического контакта.

Для практической реализации предложенного способа целесообразно сформировать три временные зоны селекции информативных сигналов, положение которых зависит от текущей высоты головки рельса. Вследствие короткого времени пробега ультразвуковых волн (до 100 мкс) удается реализовать частоту посылок зондирующих импульсов в 2...2,5 раза больше, чем реализовано в настоящее время (вместо 4...10 кГц), что снимает ограничения по скорости сканирования.

Предлагаемое техническое решение позволяет обнаруживать участки рельсов с продольными внутренними трещинами; оценивать их размеры как по ширине, так и вдоль головки рельса; определять глубину залегания продольных трещин горизонтальной ориентации; оценивать качество акустического контакта под преобразователями; повысить частоту посылок зондирующих импульсов, способствуя увеличению скорости контроля.

С целью дальнейшей автоматизации контроля рельсов рассмотрена возможность классификации обнаруженного дефекта в соответствии с действующей нормативно-технической документацией. Для реализации предложенного способа с учетом возможного износа головки рельса следует отслеживать зоны временной селекции относительно временного положения углового эхосигнала.

Выполненные исследования позволяют приступить к испытаниям способа в полевых условиях на рабочих скоростях съемных дефектоскопических тележек (до 6 км/ч) и диагностических комплексов (до 100 км/ч).

Ключевые слова: рельсы, продольные трещины, ультразвуковой контроль, эхометод, зеркально-теневого метод.

Введение

На российских железных дорогах действует отлаженная система диагностики основных элементов железнодорожного пути, в том числе и дефектоскопии рельсов. С помощью мобильных (вагоны-дефектоскопы и автомотрисы) и съемных (дефектоскопные тележки) средств дефектоскопии ежегодно изымаются из пути более 40 тыс. дефектных рельсов (ОДР), угрожающих движению поездов.

В связи с дальнейшим совершенствованием технологии производства рельсов, их укладки и содержания пути меняются условия зарождения и развития дефектов усталостного происхождения в рельсах. Поэтому исследования по дальнейшему совершенствованию методов и средств диагностики рельсов являются актуальными как в России, так и за рубежом [1–4].

До настоящего времени усилия разработчиков дефектоскопической техники были направлены на обнаружение поперечных трещин в го-

ловке рельсов. Эти дефекты являются наиболее опасными, так как могут привести к внезапному излому рельса под поездом.

Для их выявления традиционно во всех средствах дефектоскопии применяются ультразвуковые наклонные преобразователи (ПЭП) с углами ввода ультразвуковых (УЗ) колебаний $\alpha = 70^\circ$ и $\alpha = 58^\circ$ (55°) (схемы прозвучивания «РОМБ» и «РОМБ+», на которые получены патенты на изобретения [5]).

Однако на сегодняшний день в рельсах поперечные трещины составляют всего лишь 20 % дефектов в головке, а около 80 % дефектов – продольные трещины [6, 7].

Продольные трещины зарождаются с верхней рабочей выкружки головки или от поверхности катания и распространяются в глубину металла до 5...15 мм (рис. 1) в сторону нерабочей грани головки [8], что соответствует дефектам по кодам 30, 11, 16, 19 распоряжения ОАО «РЖД» № 2499р от 23 октября 2014 г.

Анализ дефектограмм с указанными дефектами показывает, что существующие схемы прозвучивания, реализованные в современных дефектоскопах, не обеспечивают формирования четких и однозначных сигналов от искомых дефектов. В результате своевременное обнаружение их затруднено и требует немало опыта от

расшифровщиков. Из 10...14 УЗ-каналов дефектоскопических систем только один канал с пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) с углом ввода 0° (прямой преобразователь) и использованием продольных УЗ-волн предназначен для обнаружения рассматриваемых трещин [9].

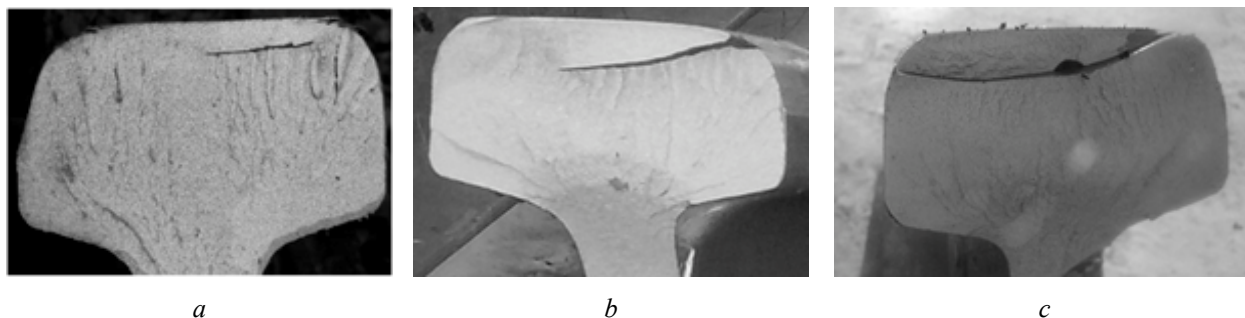


Рис. 1. Продольные трещины в головке по коду 30: *a* – трещина не пересекает продольную ось рельса; *b* – пересекает продольную ось; *c* – пересекает всю ширину головки рельса

Fig. 1. Longitudinal cracks in the head according to code 30: *a* - the crack does not cross the longitudinal axis of the rail; *b* - crosses the longitudinal axis; *c* - crosses the entire width of the rail head

Однако прямой преобразователь может выявлять только трещины, заходящие в проекцию шейки (т. е. достаточно развитые). Кроме того, глубина залегания трещин, как правило, находится в мертвой зоне преобразователя.

Возможные отражения от краев трещин при наклонном вводе УЗ-колебаний за счет формирования дифрагированных волн, как правило, имеют незначительные амплитуды и на рабочей чувствительности дефектоскопа на фоне неизбежных при практическом контроле шумов (помех) фиксируются неуверенно.

В основном обнаружение продольных горизонтальных расслоений прямым ПЭП осуществляется только благодаря многократным переотражениям УЗ-колебаний от плоскости трещины и внутренней поверхности катания рельса. Однако, как показывают результаты принудительных доломов рельсов с рассматриваемыми трещинами, многие из них трудно назвать горизонтальными, так как в процессе развития трещины от рабочей выкружки вглубь сечения головки они приобретают определенный наклон ($10...20^\circ$) относительно горизонтали. В результате сигналы, отраженные от плоскости трещины, не возвращаются к излучающему/приемному ПЭП.

Около 13 % из проанализированных горизонтальных трещин в головке вообще не вызывают появления эхосигналов ни в одном из эхоканалов. Решение о наличии дефекта принимается только за счет одновременного пропадания двух

линий донных сигналов и наличия значительного по амплитуде и длительности импульса в магнитном канале дефектоскопического комплекса [10].

Таким образом, в действующих схемах прозвучивания современных дефектоскопов и комплексов отсутствуют эффективные схемы и методы, позволяющие надежно и однозначно обнаруживать продольные трещины в головке рельсов. Наиболее массовые дефекты в виде продольных горизонтальных трещин известными способами обнаруживаются неуверенно, что приводит как к пропуску опасных дефектов, так и к перебраковке исправных рельсов с незначительными поверхностными повреждениями.

Действующей нормативной документацией по степени опасности рассматриваются две группы продольных трещин в головке рельсов: с глубиной расположения от 2,0 до 8,0 мм (дефекты кодов 10, 11, 12, 16 и 19); с глубиной расположения 8,0 мм и более от поверхности катания (по коду 30). Последние, вне зависимости от длины и зоны расположения дефекта по длине рельса, относят к опасным, остродефектным рельсам (ОДР), которые подлежат замене без промедления. Подповерхностные продольные трещины (до 8,0 мм) относят к ОДР только в том случае, когда их протяженность по длине рельса превышает 70 мм. Причем чем шире (поперек рельса) распространяется трещина, тем опаснее дефект. Весьма важно иметь возможность разделять их по глубине залегания – до 8 мм и более 8 мм.

В связи с этим для решения весьма актуальной задачи обнаружения и измерения параметров продольных трещин в головке рельсов предлагается достаточно простой в реализации способ ультразвукового обнаружения указанных дефектов.

Целью работы является исследование предложенного способа обнаружения продольных трещин в головке рельса с использованием эхо- и зеркально-теневого методов ультразвуковой дефектоскопии. В процессе исследований необходимо уточнить временные параметры ожидаемых сигналов от искомых дефектов и предложить алгоритм их обработки.

Основная идея способа

Основная идея предлагаемого технического решения – одновременная реализация эхо- и зеркально-теневого методов (ЗТМ) УЗ-контроля для оценки параметров продольной трещины

в головке рельсов. В процессе перемещения наклонного ПЭП вдоль рельса ориентированный поперек головки рельса наклонный ПЭП последовательно озвучивает искомую трещину сверху и снизу ее плоскости (рис. 2). По принятым эхосигналам от трещины (эхометод) и анализу амплитуд U_{AG} эхосигналов от нижних выкружек головки рельса (зеркально-теневого метод) можно судить о параметрах (глубине залегания, ширине трещины в плане и протяженности по длине рельса) искомой трещины.

Очевидно, что предварительно могут быть определены временные положения рассмотренных выше сигналов AG , CG и TC с допуском на износ головки рельса и вероятного положения искомой трещины. Для приема сигналов можно сформировать заранее рассчитанные временные зоны (зоны временной селекции) с учетом типа и геометрии рельсов.

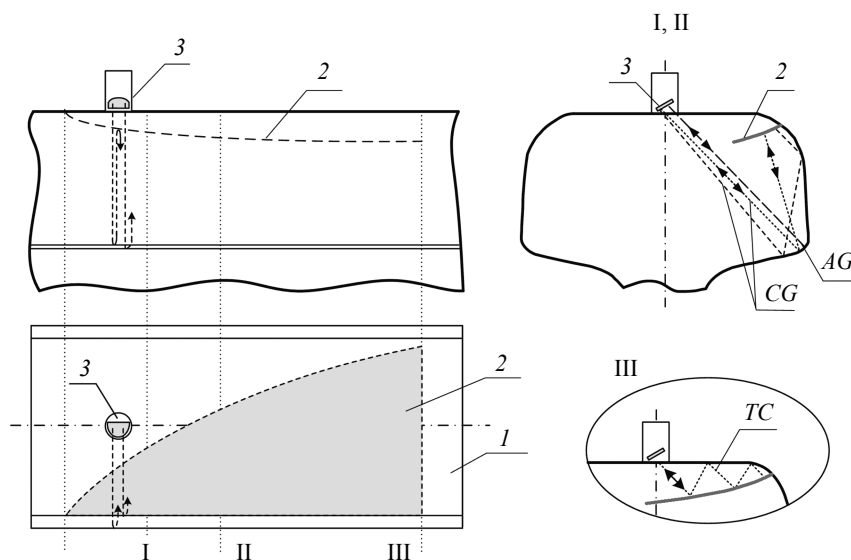


Рис. 2. Процесс последовательного озвучивания продольной трещины в головке рельса в трех проекциях: 1 – головка контролируемого рельса с рабочей грани; 2 – продольная трещина; 3 – наклонный ПЭП; I, II, III – сечения головки рельса при развитии продольной трещины и разных положениях ПЭП по мере перемещения по поверхности катания головки рельса; AG – траектория лучей «углового» сигнала; CG – сигнала от нижней плоскости трещины; TC – сигнала от верхней плоскости озвучиваемой трещины

Fig. 2. The process of sequential sounding of a longitudinal crack in the rail head in three projections: 1 - the head of the controlled rail from the working face; 2 - longitudinal crack; 3 - inclined probes; I, II, III - section of the rail head during the development of a longitudinal crack and different positions of the probes as they move along the rolling surface of the rail head; AG is the path of the rays of the "angular" signal; CG is the signal from the lower plane of the crack; TC - signal from the upper plane of the voiced crack

По анализу сигналов от нижних выкружек головки рельсов и эхосигналов, сформированных от трещины 2, можно однозначно судить о степени развития искомой трещины по ширине головки рельса 1.

Протяженность трещин по длине рельса можно определить по длительности ΔL_{AG} амплитудной огибающей эхосигнала U_{AG} от ниж-

ней выкружки головки рельса, где амплитуда на ПЭП ниже порогового уровня (рис. 3).

По временным положениям эхосигналов с нижней поверхности (CG) и от верхней плоскости (TC) трещины 2 при известной скорости распространения УЗ-колебаний в металле рельса 1 можно однозначно по известным выражениям определить глубину залегания трещины относи-

тельно поверхности катания, причем практически на любой стадии развития. Таким образом, анализируя сигналы, получаемые в процессе последовательного перемещения преобразователя вдоль рельса с определенной скоростью, можно измерить параметры продольной трещины в головке рельса.

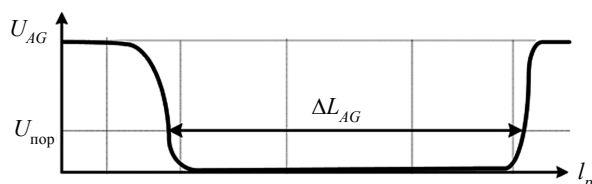


Рис. 3. Поведение амплитудной огибающей эхосигналов (угловых сигналов) от нижних выкружек головки рельса при сканировании продольной трещины 2: ΔL_{AG} – протяженность участка снижения уровня огибающих сигналов от нижней выкружки головки ниже порогового уровня $U_{пор}$ в процессе перемещения ПЭП вдоль рельса

Fig. 3. The behavior of the amplitude envelope of the echo signals (angular signals) from the lower fillets of the rail head when scanning a longitudinal crack 2: ΔL_{AG} is the length of the section for reducing the level of envelopes of the signals from the lower fillet of the head below the threshold level U_{thr} in the process of moving the probe along the rail

Благодаря излучению УЗ-колебаний поперек головки в сторону нижнего угла головки рельса,

приему эхосигналов от нижней и верхней плоскостей трещины, совместному анализу сигналов от трещины и огибающей сигналов от нижнего угла головки удастся не только получить образ продольной трещины, но и классифицировать ее по степени опасности в соответствии с действующими нормативными документами европейских стран и ОАО «РЖД» (табл. 1). Критерием браковки являются комбинации эхосигналов AG , CG , TC в соответствии с табл. 1. Как показывает практика, настройку чувствительности следует осуществить таким образом, чтобы амплитуда углового сигнала (AG) превышала пороговый уровень на 12 дБ. При этом сигналы от нижней и верхней плоскостей продольной трещины уверенно обнаруживаются.

При реализации предлагаемого способа используется наклонный (в зависимости от типа и конфигурации головки рельса под углом от 30 до 70°) ввод и излучаются сдвиговые (поперечные) УЗ-колебания со скоростью распространения в металле $c_t = 3,26$ мм/мкс. При этом временное положение эхосигнала от верхней плоскости трещины при рассмотренных выше для прямого ПЭП условиях ($h = 12$ мм) составляет уже более 9,0 мкс. Это обеспечивает четкое временное разделение эхосигнала от трещины и зондирующего импульса, предоставляя возможность измерения временного интервала между ними.

Таблица 1. Классификация дефектов в соответствии с нормативными документами

Table 1. Classification of defects in accordance with regulatory documents

ПЭП	Эхосигналы	Сечения дефектного участка (по рис. 2)			Дефект отсутствует	
		I (до 15 мм)	II (15...20 мм)	III (от 20 мм)	Контакт есть	Контакта нет
3	AG	+	–	–	+	–
	CG	+	+	–	–	–
	TC	–	–	+	–	–
Группы дефектов	По классификации Railtrack [11]	$L (< 10 \text{ мм})$	$M (10...19 \text{ мм})$	$Z (20...19 \text{ мм}),$ $ZE (> 30 \text{ мм})$	–	–
	По НТД 2499р	«Узкие»		«Широкие»	–	–

Моделирование формирования сигналов

С целью уточнения основных параметров предлагаемого способа контроля выполнено математическое моделирование распространения УЗ-лучей с помощью компьютерной программы RAIL-3D [12]. Программа предназначена для трехмерного моделирования процессов распространения и формирования эхосигналов при УЗ-контроле рельсов и других металлоизделий. Эффективность программы при изучении сложных случаев формирования эхосигналов в головке рельса от разных моделей дефектов, в том числе и при зеркальном отражении

УЗ-лучей от плоскости трещины, подтверждена в [13].

С помощью программы удастся не только проследить траектории распространения УЗ-лучей в изделии сложной формы (в данном случае в головке рельса), но и оценить временные положения и амплитуды ожидаемых эхосигналов от конструктивных элементов изделия и моделей дефектов с заданными характеристиками (рис. 4).

Как видно из рис. 4, при сканировании головки рельса наклонным ПЭП формируется уверенный угловой сигнал от нижней выкружки

головки рельса с достаточной для практического использования амплитудой. Возможные переотражения в головке рельса ($t = 80$ мкс) имеют незначительную амплитуду.

От модели продольной трещины длиной 10 мм, распространяющейся под углом 20° , дополнительно к угловому сигналу фиксируется группа эхосигналов, не уступающих угловому

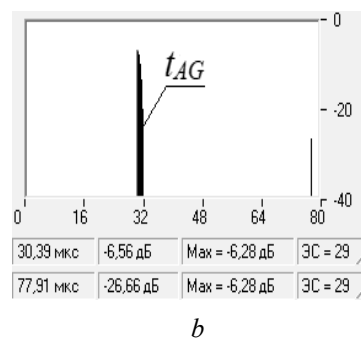
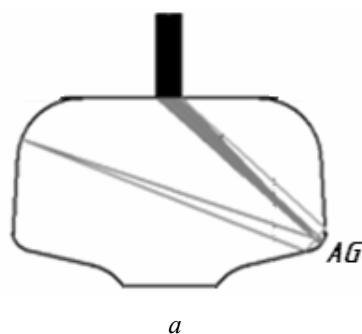


Рис. 4. Траектории распространения ультразвуковых лучей и формирование эхосигналов от нижней выкружки головки рельса: *a* – размещение наклонного ПЭП на изделии и ход распространения лучей; *b* – вид и параметры эхосигналов на развертке типа А

Fig. 4. The propagation paths of ultrasonic rays and the formation of echo signals from the lower fillet of the rail head: *a* - placement of the inclined probe on the product and the propagation path of the rays; *b* - type and parameters of echo signals on a scan of type A

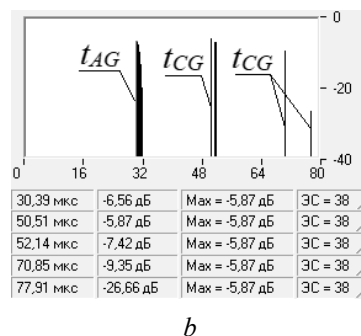
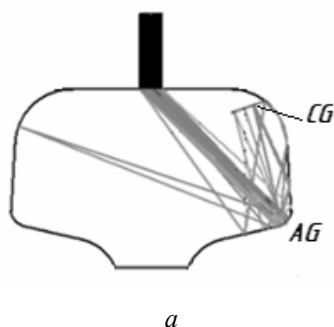


Рис. 5. Распространение УЗ-лучей в поперечном сечении головки рельса при наличии продольной трещины размером 10 мм: *a* – траектория распространения лучей; *b* – эхосигналы от нижней выкружки головки (t_{AG}) и нижней плоскости трещины (t_{CG})

Fig. 5. The propagation of ultrasound rays in the cross section of the rail head in the presence of a longitudinal crack with a size of 10 mm: *a* - the path of the rays; *b* - echo signals from the lower fillet of the head (t_{AG}) and the lower plane of the crack (t_{CG})

В аналогичном моделировании трещины размером 20 мм появляются дополнительные сигналы от верхней плоскости дефекта, однако с амплитудой, недостаточной для уверенного выделения.

При дальнейшем увеличении размера моделируемой трещины плоскость трещины полностью перекрывает УЗ-пучок, направленный в сторону рабочей грани головки рельса (рис. 6). Формируется четкий эхосигнал от верхней плоскости трещины ($t_{TC} = 16$ мкс). Часть переотраженного от трещины УЗ-пучка перенаправляется в сторону нерабочей грани головки

и возвращается на ПЭП в виде эхосигналов $t_{пер} = 68...70$ мкс (см. рис. 6, *a*).

Очевидно, что по временному положению первого эхосигнала на рис. 6, *б* можно оценить глубину залегания трещины, а второй сигнал ввиду сложности траектории распространения внутри головки для этих целей менее пригоден. В то же время появление достаточно мощных вторых эхосигналов над зоной залегания продольной трещины (во временной зоне около 68...70 мкс) является дополнительным и надежным признаком наличия дефекта как при визуальном, так и при автоматизированном анализе.

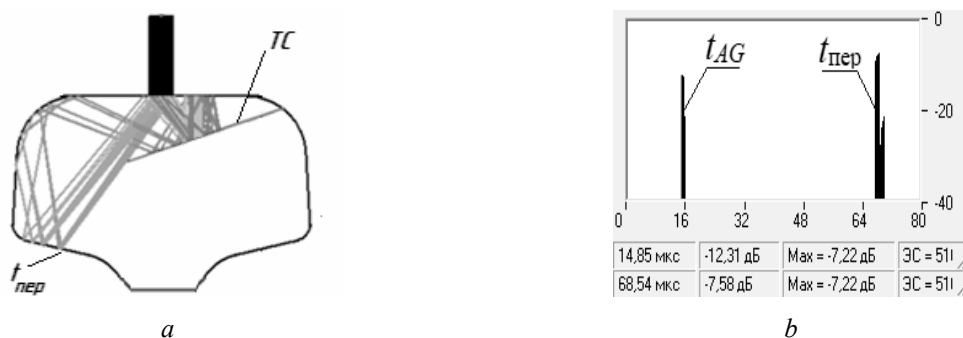


Рис. 6. Распространение УЗ-лучей в поперечном сечении головки рельса при наличии продольной трещины шириной 40 мм: *a* – траектория распространения лучей; *b* – эхосигналы от верхней плоскости трещины и переотраженных сигналов от поверхностей нерабочей грани головки рельса

Fig. 6. The propagation of ultrasound rays in the cross section of the rail head in the presence of a longitudinal crack 40 mm wide: *a* – the path of the rays; *b* – echo signals from the upper plane of the crack and re-reflected signals from the surfaces of the non-working face of the rail head

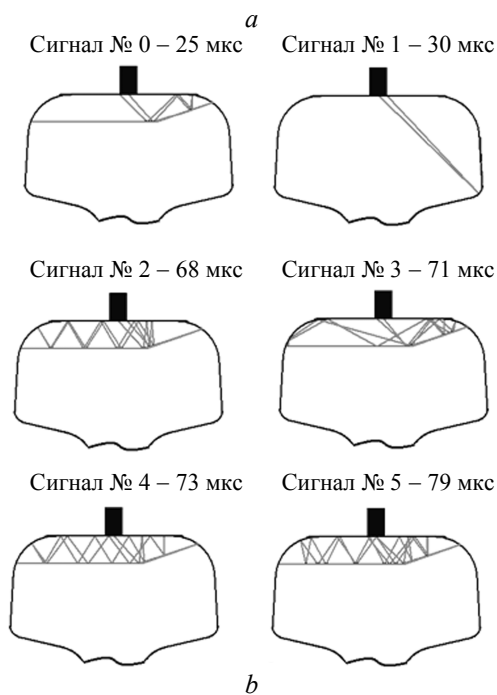
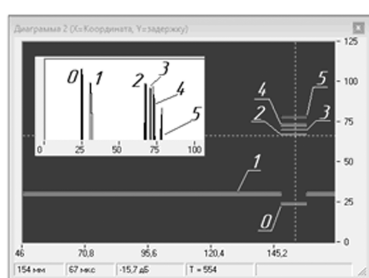


Рис. 7. Сигналы от модели дефекта во всю ширину головки (*a*) и траектории распространения УЗ-лучей в поперечном сечении головки рельса при наличии широкой продольной трещины, пересекающей всю головку (*b*)

Fig. 7. Signals from the defect model in the entire width of the head (*a*) and the path of propagation of ultrasound rays in the cross section of the rail head in the presence of a wide longitudinal crack crossing the entire head (*b*)

При трещине, развитой на всю ширину головки рельса, наблюдаются эхосигналы во временной зоне (5...27) мкс, а также многократные переотражения от верхней поверхности озвучиваемой трещины (сигналы № 2, 3, 4, 5) на рис. 7, что является отличительным признаком развитой трещины.

Таким образом, ключевыми временными параметрами для выделения сигналов от искомых продольных трещин являются: t_{AG} – временное положение углового сигнала от нижней выкружки головки; t_{CG} – задержка эхосигнала от нижней плоскости трещины (crack, gauge corner), полученный путем переотражения УЗ-лучей от нижней плоскости головки со стороны рабочей грани до нижней плоскости трещины и обратно к ПЭП; t_{TC} – от возможного эхосигнала от верхней плоскости трещины (top of crack) непосредственно под ПЭП.

Параметр t_{TC} актуален для трещин шириной от 20 мм и более и в зависимости от глубины залегания трещины может иметь значения практически от 0 до 35 мкс, если считать, что продольные горизонтальные трещины, залегающие глубже 30 мм, на практике не встречаются.

Естественно, значения временных положений рассмотренных выше эхосигналов (времени задержки относительно зондирующего импульса) справедливы для типового профиля головки рельса без износа. В реальных условиях допустимый износ высоты головки рельса составляет 10 мм, а на практике может иметь и большее значение [14]. При этом временное положение углового сигнала t_{AG} может сместиться в сторону зондирующего импульса почти на 8...10 мкс. Поэтому расчет зон временной селекции для выделения характерных сигналов целесообразно привязать к временному положению углового

сигнала t_{AG} , который является ориентиром текущей высоты головки рельса:

$$h_{AG} = \frac{t_{AG}(c_t \cos \alpha)}{2}. \quad (1)$$

Можно утверждать, что эхосигналы, отраженные от нижней плоскости трещины, можно ожидать во временной зоне около

$$t_{AG} = kt_{CG}, \quad (2)$$

где $k = \frac{2}{c_t \cos \alpha}$; для рассматриваемого случая $k = 0,82$.

Таким образом, при реализации способа целесообразно сформировать три временные зоны селекции информативных сигналов (рис. 8).

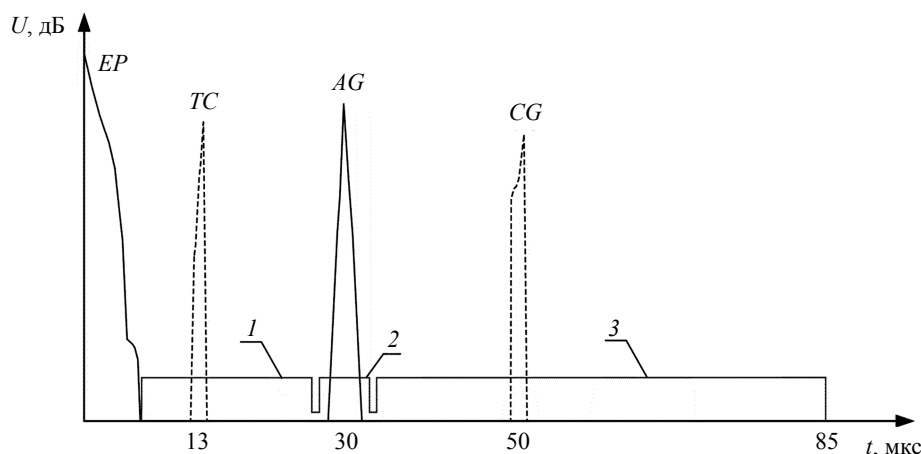


Рис. 8. Зоны временной селекции информативных сигналов при реализации способа контроля: 1 – зона для анализа возможных сигналов от верхней плоскости развитых продольных трещин; 2 – зона углового сигнала; 3 – зона для анализа эхосигналов от нижней плоскости продольных трещин на ранней стадии развития

Fig. 8. Zones of temporary selection of informative signals when implementing the control method: 1 - zone for the analysis of possible signals from the upper plane of the developed longitudinal cracks; 2 - zone of the angular signal; 3 - zone for the analysis of echo signals from the lower plane of longitudinal cracks at an early stage of development

Зона 1 для анализа возможных сигналов от верхней плоскости развитых (более 20 мм) продольных трещин t_{TC} . Временные параметры зоны от конца зондирующего импульса до начала зоны селекции углового сигнала составляют 5...27 мкс.

Зона 2 для выделения углового сигнала t_{AG} , где конец зоны выводится из выражения (1), плюс некоторый запас 3 мкс, а начало зоны, с учетом возможного износа головки рельса, можно принять равным 30 мкс.

Зона 3 для анализа эхосигналов t_{CG} от нижней плоскости продольных трещин на ранней стадии развития (шириной до 15 мм). Временное положение центра зоны определяется выражением (2), а ширина зоны составляет 33...85 мкс.

Полученные при моделировании временные значения соответствуют неизношенной поверхности катания и конкретной модели дефекта. Естественно, в реальных ситуациях в зависимости от конфигурации озвучиваемой трещины временные положения сигналов будут иметь иные значения. Поэтому для общего случая зоны временной селекции целесообразно выбрать в диапазонах, приведенных выше.

В результате обработки сигналов контроля в процессе сплошного сканирования вдоль продольной оси рельса заключается в отслеживании положения углового сигнала во 2-й временной зоне. При появлении сигналов в 1-й зоне с одновременным пропаданием (уменьшением ниже порога) сигнала во 2-й зоне путем измерения параметров эхосигналов производится анализ развитой (по ширине головки) продольной трещины. Появление сигналов в 3-й зоне и наличие углового сигнала выше порогового уровня (линия углового сигнала на развертке типа *B* не прерывается) дает возможность оценить параметры продольной трещины на начальной стадии развития.

Как видно из рис. 8, все информативные сигналы при реализации способа находятся во временной зоне от зондирующего импульса до 90 мкс. При этом частоту посылок зондирующих импульсов в этом случае можно принять равным $F = 10$ кГц ($T = 100$ мкс). Это позволяет реализовать значительную скорость сканирования более 120 км/ч, при этом интервал озвучиваемого сечения рельса будет проходить через каждые 3,3 мм, что достаточно для надежного

обнаружения продольных трещин и формирования их образа.

Экспериментальная проверка способа

Целью экспериментальных исследований являлась проверка предварительных положений предлагаемого способа и результатов компьютерного моделирования программой RAIL-3D. Для этого в образце рельса типа Р65 длиной 1,2 м были изготовлены модели продольных трещин в виде пропилов (выполнены дисковой фрезой толщиной 1 мм) с рабочей выкружки головки под углом около 20° относительно горизонтали с глубиной проникновения вглубь головки на 10, 20 и 40 мм. Дополнительно продольную трещину с переменной глубиной проникновения вглубь рельса (по ширине головки) моделировали с помощью 10 рядом выполненных сверлений диаметром 3,5 мм разной глубины (от 10 до

40 мм) под тем же наклоном, что и пропилы (рис. 9).

Экспериментальный ПЭП с углом ввода 42° установлен в типовой блок резонаторов дефектоскопа АВИКОН-31 [15] с ориентацией поперек головки рельса (угол разворота относительно продольной оси $\gamma = 90^\circ$). Наличие одометра и встроенного регистратора указанного дефектоскопа облегчало получение подробных дефектограмм на развертке типа В и отображение их как непосредственно на дисплее дефектоскопа, так и на экране типового ПК с возможностью оценки параметров формируемых от моделей дефектов сигналов.

Как видно из приведенных дефектограмм (рис. 10), полученные в процессе сканирования образца рельса сигналы в целом совпадают с результатами моделирования.

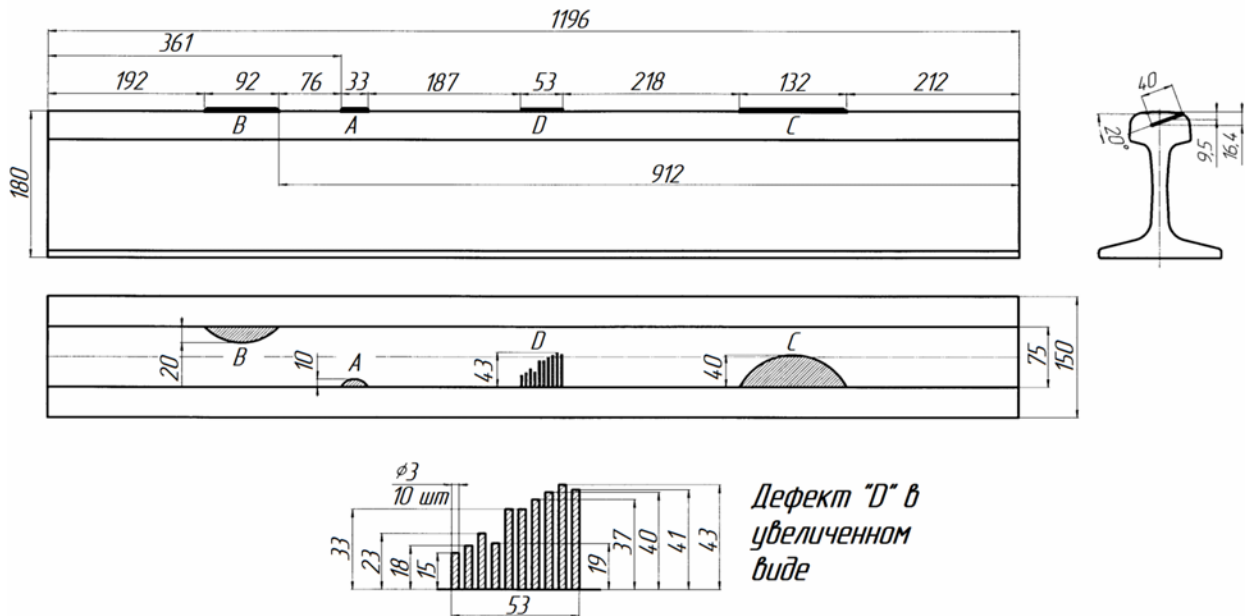


Рис. 9. Схема размещения моделей продольных трещин в образце рельса типа Р65

Fig. 9. Layout of longitudinal crack models in a rail sample of type P65

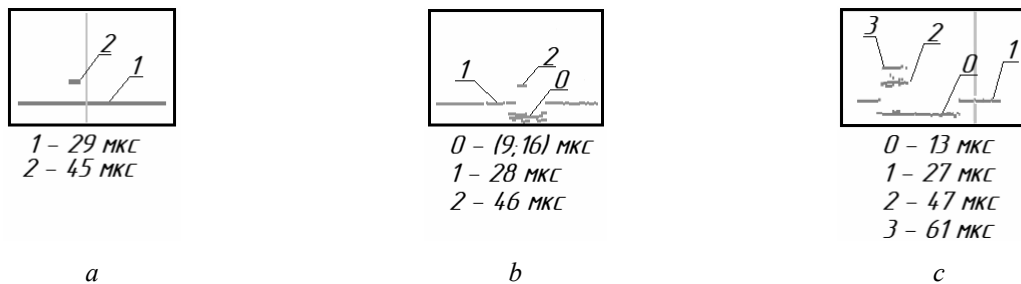


Рис. 10. Сигналы от моделей продольных трещин в процессе перемещения ПЭП вдоль рельса с размерами 10 (а), 20 (b) и 40 (с) мм

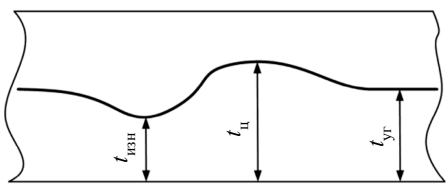
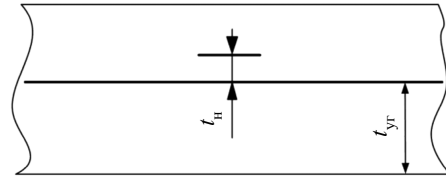
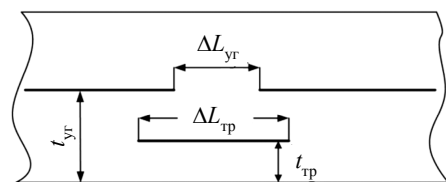
Fig. 10. Signals from models of longitudinal cracks in the process of moving the probe along the rail with dimensions of 10 (a), 20 (b) and 40 (c) mm

Модель продольной трещины начальной стадии развития шириной 10 мм, как и ожидалось, не вызывает ослабление углового сигнала, и в то же время появляются эхосигналы от нижней плоскости трещины, по временному положению которых можно оценивать зону зарождения трещины (рис. 10, а). Над моделья-

ми трещин больших размеров (от 20 мм), перекрывающих угловой сигнал, появляются сигналы от верхней плоскости трещины, и наблюдается четкое пропадание углового сигнала, по длительности отсутствия которого можно определить протяженность трещины по длине рельса (рис. 10, б, с).

Таблица 2. Дефектные ситуации и их дефектограммы

Table 2. Defective situations and their defectograms

№ п/п	Вид дефектограммы	Соотношения параметров сигналов	Примечания
1		$t_{\text{изн}} < t_{\text{уг}}$ $t_{\text{ц}} > t_{\text{уг}}$	Износ головки и нарушение центровки ПЭП
2		$t_{\text{н}} + t_{\text{уг}} < 2t_{\text{уг}}$	Трещина на начальной стадии. Линия углового сигнала не прерывается
3		$t_{\text{тр}} < t_{\text{уг}}$ $\Delta L_{\text{тр}} \geq \Delta L_{\text{уг}}$	Развитая трещина. Как правило, протяженность трещины на выкружке головки рельса больше, чем внутри головки

По результатам моделирования и экспериментальных исследований предложенного способа контроля можно сформулировать следующие правила анализа дефектограмм (см. табл. 2).

1. В процессе сканирования на бездефектных участках наблюдается стабильный угловой сигнал во временной зоне определяемой выражением (1). Незначительные отклонения временного положения углового сигнала могут свидетельствовать о наличии заметного износа головки рельса (высоты головки) или нарушении центровки ПЭП относительно продольной оси рельса.

2. Появление эхосигналов во временной зоне за угловым сигналом при отсутствии прерывания последнего в процессе сканирования свидетельствует о наличии в головке рельса трещины на начальной стадии развития (шириной до 15 мм). По временному положению этих сигналов можно оценить зону зарождения продольной трещины (на рабочей выкружке или на поверхности катания головки рельса).

3. Прерывание углового сигнала в процессе сканирования при стабильном акустическом контакте является признаком обнаружения продольной трещины шириной (в плане головки) более 15...20 мм. Длительность прерывания несет информацию о протяженности трещины по длине рельса.

4. В дефектной ситуации по п. 3 положения эхосигналов во временной зоне между угловым и зондирующими импульсами несут информацию о глубине залегания продольной трещины.

5. Для снятия неоднозначности определения причины изменения временного положения углового сигнала по п. 1 целесообразно в искательную систему включить второй идентичный наклонный ПЭП, ориентированный поперек головки (зеркально основному) в сторону нижнего угла нерабочей грани головки рельса. Совместный анализ сигналов с двух зеркально ориентированных ПЭП позволит дополнительно повысить достоверность выявления и оценки параметров продольных дефектов.

При этом появляется также возможность оценки качества акустического контакта между ПЭП и сканируемой поверхностью рельса и контроля положения искательной системы относительно продольной оси рельса.

Выводы

Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет:

- обнаруживать участки рельсов с продольными внутренними трещинами;
- оценивать размеры трещин как по ширине, так и вдоль головки рельса;
- определять глубины залегания продольных трещин горизонтальной ориентации;
- оценивать качество акустического контакта под преобразователями;
- повышать частоту посылок зондирующих импульсов, способствуя повышению скорости контроля.

Выполненные исследования позволяют приступить к испытаниям способа в полевых условиях на рабочих скоростях съемных дефектоскопических тележек (до 6 км/ч) и диагностических комплексов (до 100 км/ч).

Надежное обнаружение наиболее массовых дефектов – продольных трещин в головке рельса – с возможностью их классификации по размеру (в плане) и глубине залегания позволяет своевременно принять меры по их устранению.

Библиографические ссылки

1. Муравьев В. В., Байтеряков А. В. Влияние эксплуатационной грузонапряженности рельсов на акустические структурные шумы // Дефектоскопия. 2016. № 11. С. 50–58.
2. Thomas Hempe, René Heyder, Lars Lücking, Ronald Krull, Manfred Zacher. Der Schienenfehler Head Check - aktuelle Erkenntnisse und Möglichkeiten der Beherrschung. *Eisenbahn Ingenieur Kalender*, 2012, Ausgabe 01, pp. 31-61.
3. Antipov A. G., Markov A. A. 3D simulation and experiment on high speed rail MFL inspection. *NDT & E International*, 2018, vol. 98, pp. 177-185.
4. Муравьев В. В., Тапков К. А., Ленъков С. В. Неразрушающий контроль внутренних напряжений в рельсах при изготовлении с использованием метода акустоупругости // Дефектоскопия. 2019. № 1. С. 10–16.
5. Марков А. А., Кузнецова Е. А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов : Практическое пособие в двух книгах. СПб. : КультИнформПресс, 2010. Кн. 1. Основы. 292 с.
6. Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости / Е. А. Шур, А. И. Борц, А. В. Сухов, А. Ю. Абдурашитов [и др.]. // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 3. С. 3–9.
7. Комплексный подход к прогнозированию работоспособности и ресурса рельсов нового поколения /

И. Г. Горячева, С. М. Захаров, А. Я. Коган [и др.] // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». 2017. № 5-6. С. 16–26.

8. Шур Е. А. Повреждения рельсов. М. : Интекст, 2012. 192 с.

9. 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.

10. Марков А. А., Максимова Е. А., Антипов А. Г. Анализ развития дефектов рельсов по результатам многоканального периодического контроля // Дефектоскопия. 2019. № 12. С. 3–15.

11. Бели Я., Немеет И. Контактно-усталостные микротрещины головки рельса // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 5. С. 8–12.

12. Марков А. А., Мосягин В. В., Кескинов М. В. Программа трехмерного моделирования сигналов ультразвукового контроля изделий // Дефектоскопия. 2005. № 12. С. 7–23.

13. Марков А. А., Кескинов М. В. Обнаружение дефектов в головке рельса зеркальным методом при многократном отражении ультразвуковых колебаний // Дефектоскопия. 2008. № 7. С. 12–27.

14. Лисицын А. И., Абдурашитов А. Ю. О продлении межремонтного эксплуатационного ресурса рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 2. С. 2–6.

15. Куклин В. А. Опыт использования дефектоскопа АВИКОН-31 // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 11. С. 12–15.

References

1. Murav'ev V.V., Bajterjakov A.V. [Effect of traffic volume on acoustic structural noises in rails]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 11, pp. 657-663.
2. Thomas Hempe, René Heyder, Lars Lücking, Ronald Krull, Manfred Zacher. Der Schienenfehler Head Check - aktuelle Erkenntnisse und Möglichkeiten der Beherrschung. *Eisenbahn Ingenieur Kalender*, 2012, Ausgabe 01, pp. 31-61.
3. Antipov A. G., Markov A. A. 3D simulation and experiment on high speed rail MFL inspection. *NDT & E International*, 2018, vol. 98, pp. 177-185.
4. Murav'ev V.V., Tapkov K.A., Len'kov S.V. [Non-destructive testing of internal stresses in rails during manufacture using the acoustoelastic method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, no. 1, pp. 10-16 (in Russ.).
5. Markov A.A., Kuznecova E.A. *Defektoskopija rel'sov. Formirovanie i analiz signalov* [Defectoscopy of rails. The formation and analysis of signals]. St. Petersburg, Kul'tInformPress Publ., 2010, 292 p. (in Russ.).
6. Shur E.A., Borts A.I., Sukhov A.V., Abdurashitov A.Yu. [Evolution of rail damage by contact fatigue defects]. *Vestnik VNIIZhT*. 2015, no. 3, pp. 3-9 (in Russ.).
7. Goryacheva I.G., Zakharov S.M., Kogan A.Ya. [An integrated approach to predicting the performance and resource of new generation of rails]. *Byulleten' OUS OAO "RZhd"*, 2017, no. 5-6, pp. 16-26 (in Russ.).

8. Shur E.A. *Povrezhdenija rel'sov* [Rail damage]. Moscow, Intekst Publ., 2012, 192 p. (in Russ.).

9. Markov A.A., Maksimova E.A. [Analysis of the effectiveness of ultrasonic and magnetic channels of flaw detection systems for rail monitoring]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 22-32 (in Russ.).

10. Markov A.A., Maksimova E.A., Antipov A.G. [Analysis of the development of rail defects according to the results of multichannel periodic monitoring]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, no. 12, pp. 3-15 (in Russ.).

11. Beli Ja., Nemeet I. Contact-fatigue microcracks of the rail head]. *Put' i putevoe khozyaistvo*, 2011, no. 5, pp. 8-12 (in Russ.).

12. Markov A.A., Mosjagin V.V., Keskinov M.V. [The program for 3D modeling of signals of ultrasonic inspection of products]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2005, no. 12, pp. 7-23 (in Russ.).

13. Markov A.A., Keskinov M.V. [Detection of defects in the rail head by the mirror method with multiple reflection of ultrasonic vibrations]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2008, no. 7, pp. 12-27 (in Russ.).

14. Lisicyn A.I., Abdurashitov A.Ju. [On the extension of the overhaul life of rails]. *Put' i putevoe khozyaistvo*, 2019, no. 2, pp. 2-6 (in Russ.).

15. Kuklin V.A. [The experience of using the flaw detector AVICON-31]. *Put' i putevoe khozyaistvo*, 2018, no. 11, pp. 12-15 (in Russ.).

Investigation of the Detection Method for Longitudinal Cracks in the Head of Rail Tracks

A.A. Markov, DSc in Engineering, JSC "Radioavionica", St. Petersburg, Russia

G.A. Ivanov, Master's Degree Student, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

The paper presents the results of studies of the method for detecting longitudinal cracks by ultrasonic waves in a rail head. Up to 80% of modern rails defects are longitudinal cracks. Analysis of the envelope of signals from the lower fillet of the rail head (ZTM) allows us to determine the extent of the crack along the length of the rail. For the practical implementation of the proposed method, it is advisable to form three time zones for the selection of informative signals, the position of which depends on the current height of the rail head. The short travel time of ultrasonic vibrations (up to 100 μs) allows to increase the probe pulses sending frequency by 2...2.5 times as compared to the current values (about 4...10 kHz), which removes the scanning speed restrictions.

The proposed technical solution allows to detect sections of rails with longitudinal internal cracks; evaluate their dimensions, both the width and the length along the rail head; determine the depth of horizontal longitudinal cracks; evaluate the quality of acoustic contact of the transducers; increase the sampling rate of sounding pulses, contributing to increase the speed of control.

The possibility of classifying a detected defect in accordance with the current regulatory and technical documentation is considered in order to further automate the monitoring of rails. To implement the proposed method in real conditions, taking into account the possible wear of the rail head, it is suggested to monitor the temporary selection zones relative to the temporary position of the echo signal.

The performed studies allow to test the method in the field at operating speeds of removable flaw detectors (up to 6 km/h) and diagnostic systems (up to 100 km/h).

Keywords: rails, longitudinal cracks, ultrasonic testing, echo method, mirror shadow method.

Получено 15.11.2019

Образец цитирования

Марков А. А., Иванов Г. А. Исследование способа обнаружения продольных трещин в головке рельса // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 4. С. 46–56. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-46-56.

For Citation

Markov A.A., Ivanov G.A. [Investigation of the Detection Method for Longitudinal Cracks in the Head of Rail Tracks]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 46-56 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-46-56.