

УДК 620.179.16; 620.179.14
DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И МАГНИТНЫХ КАНАЛОВ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ КОНТРОЛЕ РЕЛЬСОВ

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

Е. А. Максимова, ОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены возможности диагностических комплексов, размещенных на вагонах-дефектоскопах, при контроле рельсов со скоростью до 60 км/ч. Показана эффективность отдельных каналов комплексов, реализующих ультразвуковые методы отражения и прохождения при выявлении поперечных и продольных трещин в головке рельсов.

Проанализирована значительная база данных реальных повреждений рельсов. Показано, что около 80 % дефектов в головке рельса – это трещины продольной ориентации, которые весьма неуверенно выявляются ультразвуковыми наклонными каналами.

Впервые оценен вклад каждого из ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов в обнаружение дефектов в головке рельсов. Ни один из ультразвуковых каналов по отдельности не обеспечивает обнаружение всех рассмотренных повреждений. Магнитный метод контроля с активной системой намагничивания рельсов при поиске дефектов в головке рельсов на глубине до 20-22 мм не уступает по эффективности ультразвуковым методам контроля. Наличие магнитного канала с активной системой намагничивания позволяет дополнительно обнаруживать на 26 % дефектов больше, чем при его отсутствии.

Анализ сигналов от реальных дефектов еще раз подтвердил, что только комплексное применение ультразвуковых и магнитного методов контроля обеспечивает надежное и своевременное обнаружение опасных дефектов в рельсах.

Ключевые слова: рельсы, дефекты, диагностический комплекс, ультразвук, эхосигнал, магнитный метод, многоканальный контроль.

Введение

Эксплуатация рельсового пути на российских железных дорогах зачастую происходит в условиях высокой грузонапряженности, холодного и сурового климата со значительными годовыми перепадами температур (от -55 до $+55$ °С), не всегда удовлетворительного качества содержания рельсового пути и подвижного состава, просроченного капитального ремонта на отдельных участках. При этом на поверхности катания и внутри металла рельсов нередко зарождаются дефекты, которые при своем критическом развитии могут привести к внезапному излому рельса, а в особо неблагоприятном случае – крушению поезда.

Для недопущения изломов рельсов и вызванных ими чрезвычайных происшествий на железных дорогах ОАО «РЖД» действует комплексная система, состоящая из обширного парка (более 4,7 тыс. единиц) разнообразных средств дефектоскопии [1]:

– съемные двухниточные дефектоскопные тележки, перемещаемые по рельсам операторами и позволяющие реализовать ультразвуковые методы неразрушающего контроля (НК). Их

главным достоинством является возможность контроля рельсового пути без нарушения графика движения поездов и оперативного выявления дефектов непосредственно в момент контроля, а недостатком – ручной труд на открытом воздухе в любую погоду, малая производительность (120-140 км рельсового пути в месяц) и высокая стоимость контроля;

– совмещенные вагоны-дефектоскопы (СВД) с высокой производительностью (2,2-2,4 тыс. км в месяц и более) и наименьшими затратами на диагностику рельсов, сочетанием разных методов контроля на одном средстве, комфортными условиями для работы экипажа. Однако из-за контроля рельсов на высоких скоростях после проезда СВД имеются частично или полностью не проконтролированные участки, которые необходимо вновь пере проверять дефектоскопными тележками;

– другие средства контроля: самоходные дефектоскопные автотомотрисы, однострочные дефектоскопы для контроля стрелочных переводов и портативные ручные дефектоскопы для контроля локальных участков рельсов.

В последние годы ведутся поисковые работы по контролю остаточных напряжений в рельсах

с целью повышения качества при их производстве и своевременного принятия упреждающих мер по обеспечению безопасности движения поездов при их эксплуатации [2, 3].

С учетом того, что дефекты в рельсах могут иметь совершенно разную ориентацию, наиболее полный контроль может быть осуществлен только при многоканальном сканировании с использованием нескольких методов НК. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют дефектоскопические комплексы, размещенные на вагонах-дефектоскопах и позволяющие осуществлять контроль рельсов на скорости до 60 км/ч.

В данной работе проанализирована значительная база (663 шт.) фрагментов дефектограмм с сигналами от реальных дефектов в головке рельсов, подтвержденных специалистами Дирекций инфраструктуры. Данные получены от 5 вагонов-дефектоскопов «АВИКОН-03М» с железных дорог Северо-Западного региона РФ и Казахстана. Рассматривались участки пути как с высокой грузонапряженностью (до 150-180 млн тонн брутто), так и участки с преимущественно пассажирскими перевозками (0,1...10 млн тонн

брутто). Рабочие скорости контроля СВД лежали, в основном, в диапазоне 30...55 км/ч и иногда доходили до 60-62 км/ч.

Цель исследования – оценка эффективности отдельных методов (каналов) ультразвукового и магнитного контроля в обнаружении дефектов в головке рельсов. Это необходимо как для дальнейшего совершенствования методов и схем прозвучивания рельсов, так и для повышения эффективности и достоверности контроля дефектоскопическими комплексами.

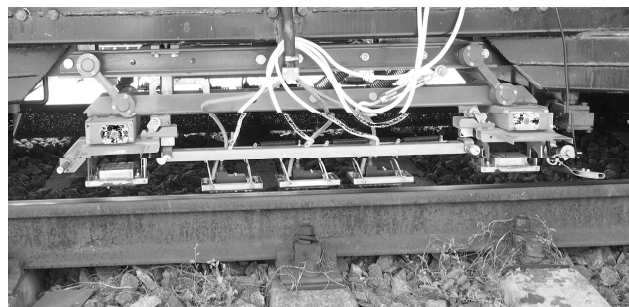
Дефектоскопические комплексы для контроля рельсов и применяемые в них методы

В дефектоскопических комплексах «АВИКОН-03М» (рис. 1), успешно эксплуатируемых на железных дорогах сети ОАО «РЖД» более 20 лет, одновременно применяются разные физические методы НК:

- ультразвуковой (УЗ);
- магнитодинамический (МД) метод (в зарубежной литературе используется термин «метод рассеяния магнитного потока» – MFL) [4, 5].
- визуальный (видеорегистрация состояния элементов рельсового пути).



a



b

Рис. 1. Совмещенный вагон-дефектоскоп (а); система ультразвуковых и магнитных датчиков, размещенных на дефектоскопической лыже (b)

Fig. 1. Combined flaw detector car (a); system of ultrasonic and magnetic transducers are on the flaw detection ski (b)

Схема прозвучивания рельсов комплекса «АВИКОН-03М» содержит по 13 каналов на каждую нитку пути.

Ультразвуковой эхометод и ультразвуковой зеркальный метод (методы отражения) основаны на отражении от дефектов УЗ-лучей, вводимых с поверхности катания рельсов под разными углами ввода ($\alpha = 58, 70, 45, 0^\circ$). При эхометодом фиксируют эхосигналы, отраженные от кромок и плоскости дефектов. Зеркальный метод позволяет фиксировать сигналы, зеркально отраженные от ровной (зеркальной) поверхности развитых поперечных трещин в головке рельсов, плохо обнаруживаемых по

эхометоду. Зеркально-теневой метод (ЗТМ) – метод прохождения – основан на анализе ослабления амплитуды донного сигнала над дефектным сечением. При этом донный сигнал ослабляется от дефекта дважды – при его прохождении до подошвы рельса и обратно к преобразователю [6].

Магнитодинамический метод (МД) реализован путем намагничивания рельсов в процессе движения СВД и регистрации изменения напряженности магнитного поля над дефектными сечениями. Возникновение этих изменений (откликов) связано с обтеканием магнитным потоком препятствия в виде трещины. Наиболее яр-

кий магнитный отклик появляется, когда трещина в головке рельса выходит на наружную поверхность. Активная намагничивающая система реализована с помощью электромагнитов, конструктивно размещенных на осях колесной пары дефектоскопической (индукторной) тележки вагона. При этом колеса тележки являют-

ся полюсами, ввод магнитного потока осуществляется через пятно контакта «колесо – рельс». Магнитный датчик, фиксирующий изменения магнитного потока, должен всегда размещаться у заднего (относительно направления движения) магнитного полюса, т. е. позади системы УЗ-преобразователей (рис. 2).

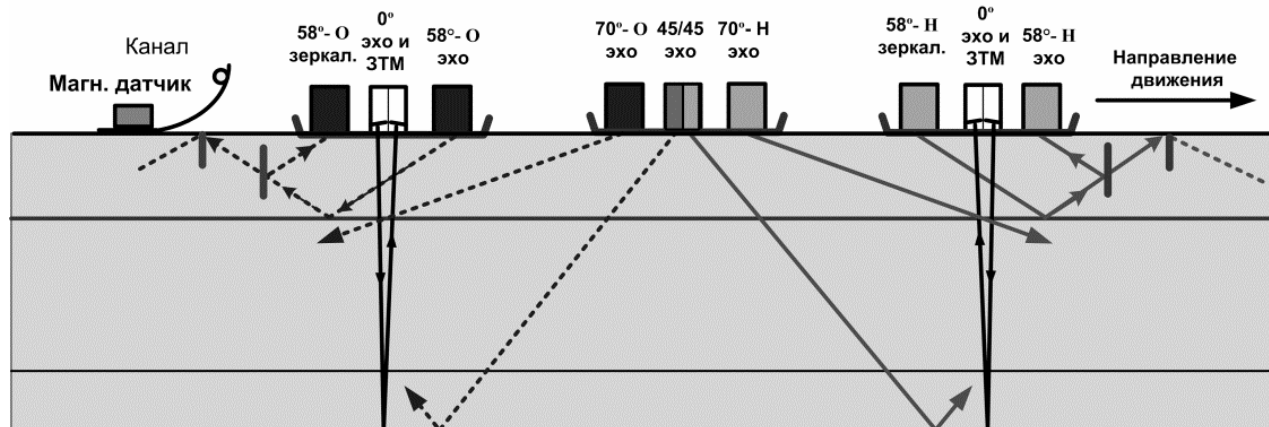


Рис. 2. Схема прозвучивания рельса дефектоскопическим комплексом (цифрами обозначены углы ввода УЗ-колебаний, буквами Н и О показаны наезжающие и отъезжающие каналы соответственно, излучающие УЗ-колебания вперед/назад по направлению движения СВД)

Fig. 2. The transducers' placement is on the flaw detection ski (angles of probes are designated by numbers)

Достоинства МД-метода многократно описаны в публикациях [7–9]:

- обнаружение поперечных и продольных трещин в головке рельсов на глубине до 20 мм;
- бесконтактность метода (не требуется контактирующая жидкость);
- возможность работы в любых климатических условиях;
- практическое отсутствие ограничения скорости контроля;
- возможность автоматизации выделения сигналов от конструктивных элементов и дефектов.

Применение МД-метода эффективно всегда, но особенно актуально в период низких температур воздуха (ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$), когда снег и замерзание контактирующей жидкости делают ультразвуковые методы бесполезными.

Видеорегистрация позволяет фиксировать поверхностные дефекты и некоторые неисправности рельсового пути (отсутствие болтов в стыковых накладках, нарушение положения скреплений и др.). По видеоизображениям удастся локализовать участки рельсового пути с поверхностными микротрещинами, со значительным износом боковой грани головки рельса. Однако заметной помощи от нее при обнаружении опасных внутренних дефектов головки рельсов, в том числе и с выходом на поверх-

ность катания, получить не удастся из-за отсутствия эффективных способов дифференциации внутренних и поверхностных трещин.

Результаты многоканального контроля рельсов всеми используемыми методами отображаются на комплексных дефектограммах.

Сигналы от характерных дефектов в головке рельсов

Около 68–72 % от всех дефектов рельсов образуются в головке, так как это сечение испытывает значительные знакопеременные нагрузки от колес подвижных составов. Поэтому в данной статье рассмотрены дефекты именно в этом сечении рельса.

Несмотря на широкое разнообразие дефектов в головке рельсов (20 типов по распоряжению ОАО «РЖД» № 2499р от 23.10.2014 «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefектных рельсов»), в основном их можно разделить на две большие группы: поперечные трещины (дефекты 2-й группы кодов 20, 21, 24, 26, 38) и продольные трещины (дефекты 3-й группы кодов 30, 31, 38).

Все усилия разработчиков дефектоскопической техники в последние два десятилетия были направлены на обнаружение поперечных трещин в головке рельсов (рис. 3). Эти дефекты являются наиболее опасными, так как могут привести к внезапному излому рельса под поез-

дом. Для их выявления традиционно во всех средствах дефектоскопии применяются ультразвуковые наклонные преобразователи (ПЭП) с углами ввода УЗ-колебаний $\alpha = 58$ и 70° (схемы прозвучивания «змейка», « 70° », «РОМБ» и «зеркальный метод»).

Как видно на рис. 3, поперечная трещина озвучивается со всех сторон (наезжающими и отъезжающими преобразователями) под разными углами. Эхосигналы формируются при озвучивании дефектов прямыми, однократно и двукратно (на рис. 3 не показаны) отраженными от разных поверхностей головки рельсов лучами. В связи с тем, что поперечные трещины обычно

имеют небольшой наклон (их нижний край обычно наклонен в сторону движения поездов на угол от 3 до 22°), в любом случае от дефекта будут зафиксированы сигналы от наезжающих и/или отъезжающих каналов дефектоскопического комплекса. Кроме того, при наезде на дефектное сечение благодаря зеркально-теневому методу уменьшается амплитуда донного сигнала (на рис. 3 преобразователь 0).

В то же время продольные трещины, наиболее часто образующиеся в процессе эксплуатации в головке рельсов, рассмотренными выше наклонными УЗ-каналами (1–6) обнаруживаются с меньшей эффективностью (рис. 4).

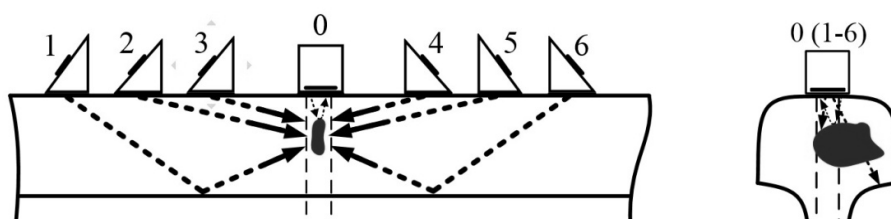


Рис. 3. Формирование эхосигналов от поперечной трещины в головке рельсов (дефекта 2-й группы) при озвучивании с разных сторон

Figt. 3. The appearance of echo signals from transverse cracks in the rail head when they are detected from both sides

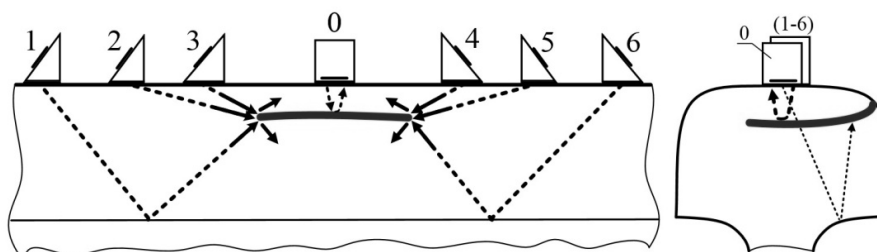


Рис. 4. Формирование эхосигналов от кромок горизонтальной трещины в головке рельсов (дефекта 3-й группы)

Fig. 4. The appearance of echo signals from the edges of a horizontal crack in the rail head

Формируемые на концах трещин дифрагированные волны имеют малые амплитуды и практически не выделяются на фоне разнообразных помех, неизбежных в реальных условиях контроля [10]. Наклонные УЗ-лучи, падающие на плоскость трещины, претерпевая многократные отражения от трещины и поверхности катания, к излучаемому преобразователю не возвращаются. Получается так, что кроме преобразователя с углом ввода $\alpha = 0^\circ$ ни один из преобразователей схемы прозвучивания комплекса не ориентирован на обнаружение наиболее распространенных дефектов в головке в виде продольных расслоений.

В результате от поперечных трещин в головке на ультразвуковых дефектограммах (отображены на В-сканах) формируются четкие наклонные пачки эхосигналов (рис. 5, a, b). Если

трещина имеет зеркальную поверхность, появляются пачки в зеркальных каналах, что свидетельствует о значительном развитии дефекта. Донный сигнал, как правило, или вовсе не прерывается (поперечная трещина не препятствует прохождению донного сигнала), или пропадает кратковременно при значительном развитии или наклонной ориентации трещины. В магнитном канале формируется короткий по длительности двухполярный импульс, причем из-за обтекания магнитным потоком трещины передний фронт сигнала имеет положительную полярность. Чем больше размер трещины, тем больше амплитуда магнитного отклика. При выходе трещины на поверхность головки размах сигнала достигает всей высоты зоны отображения.

Продольные (горизонтальные) трещины в головке рельсов по вышеназванным причинам

гораздо слабее фиксируются наклонными УЗ-каналами, чем поперечные трещины (рис. 5, *c*). Часто протяженные пачки эхосигналов с характерным наклоном (как на рис. 5, *a, b*) отсутствуют, а формируются небольшие неровные пачки, отраженные от острых кромок расслоений. Причем чем меньше глубина этих расслоений, тем более хаотично выглядят сигналы (рис. 5, *d*, зоны 2 и 3). Естественно, продольные дефекты лучше фиксируют прямые преобразователи с углом ввода $\alpha = 0^\circ$. При этом наблюдается пропадание донного сигнала, приблизительно равное длине горизонтальной трещины в головке рельса, а ниже отображаются эхосигналы, отраженные от ее поверхности (рис. 5, *c, d*, зона 6). При глубине горизонтальной трещины более 10-12 мм эхосигналы в канале $\alpha = 0^\circ$ образуют серию горизонтальных линий. В магнитном кана-

ле (зона 1 на рис. 5, *a-c*) формируются протяженные по длительности импульсы, имеющие несколько отрицательных и положительных выбросов (первая полуволна обычно имеет отрицательную полярность, а задний фронт импульса несколько растянут по длине).

Как показали исследования (рис. 6), в современных рельсах продольные (горизонтальные) трещины в головке рельсов образуются и выявляются гораздо чаще (около 80 % от всех дефектов головки), чем поперечные трещины (около 20 % дефектов). Эти показатели согласуются со многими исследованиями ВНИИЖТ. По данным работ [11, 12], в современных рельсах доля контактно-усталостных поперечных трещины в головке по коду 21 составляет менее 20 % (ранее количество таких дефектов было 60 % и более в общем числе изъятых рельсов).

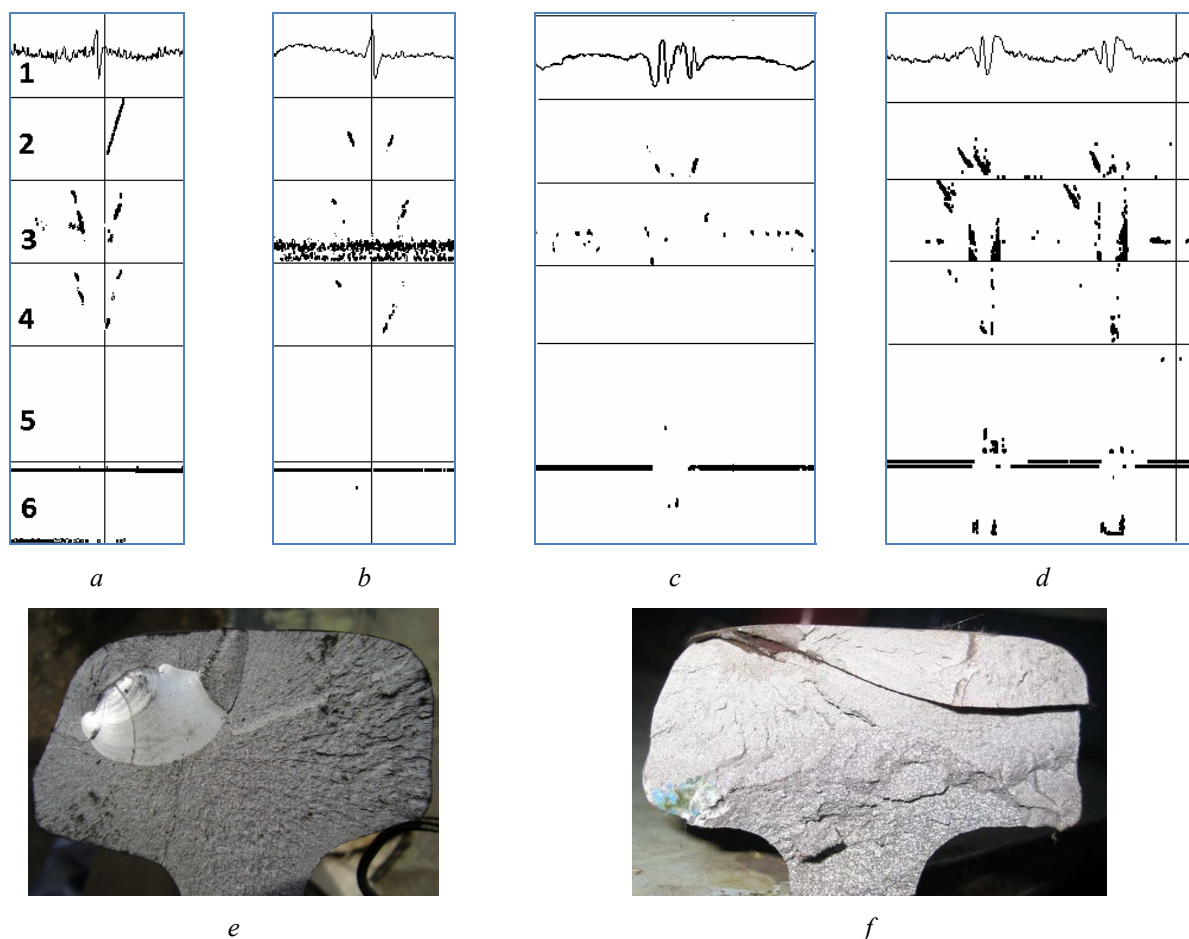


Рис. 5. Характерные сигналы от поперечных (*a, b*) и от продольных (*c, d*) трещин в головке: 1 – сигналы магнитного канала; 2 – УЗ-эхоканалы «70°»; 3 – эхоканалы «58°»; 4 – зеркальные каналы «58°»; 5 – эхоканалы «45°»; 6 – каналы эхо- и ЗТМ «0°»; фотографии рельсов с дефектами (*e, f*). По горизонтали – путь сканирования (длина рельса), по вертикали – амплитуда сигнала (1) и время распространения УЗ-колебаний (2–6)

Fig. 5. Signals from transverse (*a, b*) and from longitudinal (*c, d*) cracks in the rail head: 1 - magnetic channel signals; 2 - ultrasonic echo channels “70°”; 3 - echo channels “58°”; 4 - “58°” echo-mirror method; 5 - echo channels “45°”; 6 - channels of echo and mirror through transmission method “0°”; photo of rails with defects (*e, f*). Horizontal - scan path (rail length), vertical - signal amplitude (1) and the propagation time of ultrasonic oscillations (2-6)

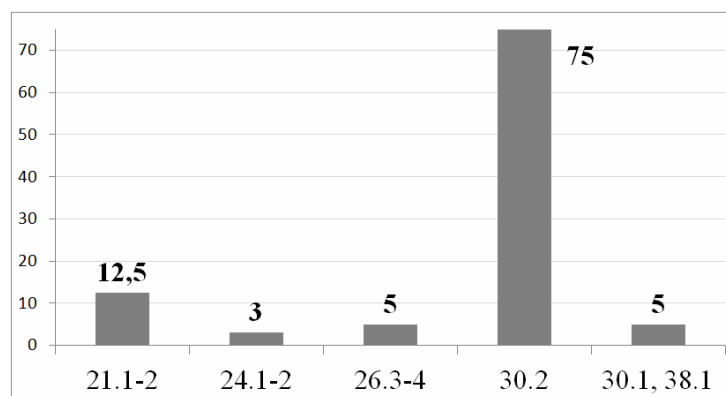


Рис. 6. Распределение дефектов в головке рельсов по типам, % (всего проанализировано 663 дефекта)

Fig. 6. The distribution of defects in the rail head by type, % (663 defects were analyzed)

Как видно из вышеизложенного, создается парадоксальная ситуация: в диагностических комплексах на выявление наиболее распространенных продольных трещин практически ориентирован только один ультразвуковой преобразователь с углом ввода $\alpha = 0^\circ$, реализующий зеркально-теневой и эхометоды контроля.

Частично эту проблему решает применение в дефектоскопическом комплексе «АВИКОН-03М» двух прямых преобразователей, размещенных на расстоянии B друг от друга (в начале и в конце искательной системы – см. каналы «0°» на рис. 2). Это позволяет более надежно обнаруживать продольные расслоения. Повышается не только надежность обнаружения искомых дефектов, но и достоверность (помехоустойчивость) системы. Пропадание донного сигнала последовательно под одним, а затем под вторым прямым ПЭП через интервал времени $\Delta t = B / V_c$, где V_c – скорость сканирования, происходит с большей вероятностью над дефектом, чем от случайного нарушения акустического контакта или прочих помех.

В связи с этим одним из актуальных вопросов развития рельсовой дефектоскопии является разработка способов надежного обнаружения горизонтальных трещин в головке рельсов, причем крайне важно выявлять и сложные дефекты, когда под расслоением одновременно развиваются и опасные поперечные трещины.

Исследование вклада отдельных каналов дефектоскопического комплекса в обнаружение дефектов

В процессе исследования рассмотрены фрагменты дефектограмм с сигналами от реальных дефектов в головке рельсов. Фиксировалось, какие каналы дефектоскопического комплекса «АВИКОН-03М» реагировали на разные типы

дефектов и оценивалась эффективность отдельных каналов. Измерялась глубина залегания дефектов, протяженность пропадания донных сигналов над дефектами и величина размаха амплитуды откликов в магнитном канале¹.

На рис. 7 показано количество выявленных дефектов в головке рельсов разными каналами дефектоскопического комплекса «АВИКОН-03М» (дефект считался обнаруженным при наличии сигналов в канале с определенным углом ввода только в наезжающем, только в отъезжающем или в обоих каналах одновременно).

Наиболее эффективными УЗ-каналами при обнаружении дефектов в головке рельсов являются эхоканалы с углами ввода 58° и 70° (зафиксировали, соответственно, 73 и 60 % от всех обнаруженных опасных дефектов). Некоторое удивление авторов вызвало то, что эти каналы не выявили довольно большого количества дефектов (27...40 %). Очевидно, это вызвано горизонтальной ориентацией большинства (80 %) анализируемых дефектов, а указанные наклонные каналы традиционно ориентированы на выявление поперечных трещин в головке и имеют меньшую эффективность при обнаружении горизонтальных расслоений (см. рис. 5).

Как известно, зеркальный метод контроля (на рис. 7 «58-зерк.») предназначен для обнаружения развитых поперечных трещин с зеркальной поверхностью, которые в современных рельсах встречаются довольно редко. Однако если сигналы в этом канале зафиксированы, то вероятность наличия опасного дефекта высока (сигналы не могут быть получены на пассивный приемник, если нет внутреннего отражателя в рельсе). Зеркальные каналы зафиксировали 33 % дефектов, но условные размеры пачек сигналов от этих дефектов, как правило, были небольшими.

¹ Авторы благодарят инженера НИЛ НК ОАО «Радиоавионика» М. В. Карелина за значительную помощь в анализе файлов дефектограмм вагонов-дефектоскопов.

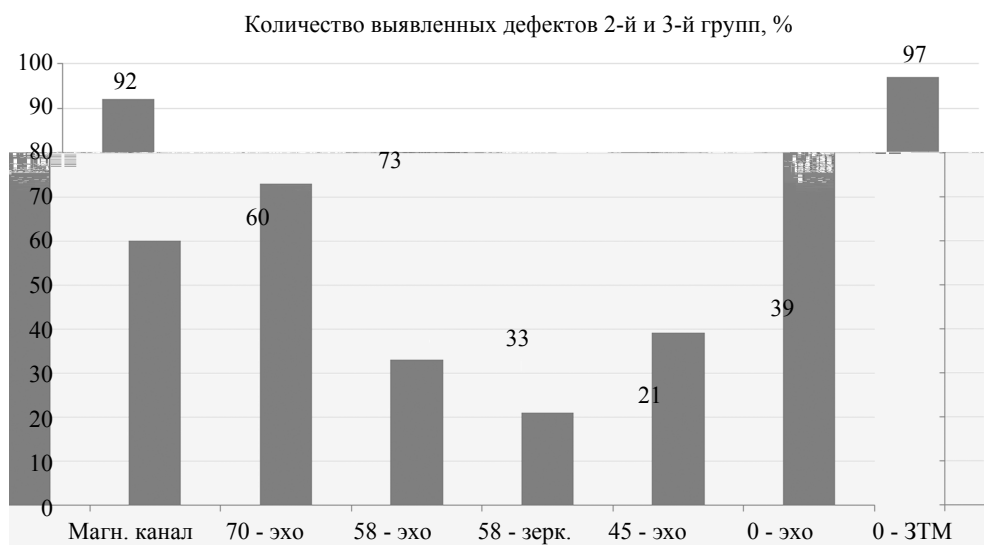


Рис. 7. Эффективность обнаружения дефектов в головке рельсов под разными углами ввода УЗ-колебаний и магнитным методом, % (всего 663 дефекта)

Fig. 7. The efficiency of detection of defects in the rail head by different ultrasound angles and by magnetic method, % (total 663 defects)

Каналы с углом ввода $\alpha = 45$ (42°) предназначены, в основном, для выявления дефектов в шейке и подошве, но контролируют и нижнюю часть головки рельса. Из анализируемых дефектов 21 % вызвали появление небольших пачек сигналов в этих каналах.

Как видно на рис. 7, наиболее часто анализируемые дефекты вызвали срабатывание ультразвукового канала зеркально-теневого метода (в 97 % случаях над дефектом прерывался донный сигнал – канал «0-ЗТМ») и магнитного канала (92 % дефектов). Можно предположить, что несплошность в головке рельса становится препятствием не только для магнитного потока, вытесняя магнитное поле на поверхность катания рельса, но и (частичным или полным) для УЗ-волн, направленных от поверхности катания к подошве рельса и обратно, вследствие чего над дефектом амплитуда донного сигнала уменьшается ниже заданного порога.

С целью более подробного анализа эффективности УЗ-каналов авторы исключили из рассматриваемых дефектограмм сигналы магнитного канала и повторно оценили эффективность обнаружения дефектов в головке рельсов. Экспертным путем выяснено, что при отсутствии магнитного канала почти каждый четвертый дефект (26 %) был бы пропущен оператором-расшифровщиком, поскольку эхосигналы от дефектов в УЗ-каналах практически отсутствовали (имелись только пропадание донного сигнала и импульс в магнитном канале). Отметим, что даже при наличии сигналов от дефектов

в УЗ-каналах степень достоверности обнаружения остальных дефектов частично снижается при исключении магнитного канала. Это еще раз подчеркивает важность наличия в составе дефектоскопических комплексов канала с активной системой намагничивания рельсов.

Если рассматривать выявляемость дефектов отдельно наезжающими (Н) и отъезжающими (О) каналами для каждого угла ввода УЗ-колебаний, то показатели для отдельных ПЭП ухудшаются на 13-20 % (рис. 8). Ни один из эхоканалов по отдельности не фиксирует более 40-60 % дефектов. Возможность обнаружения дефекта при наклонном вводе ультразвука напрямую зависит от его ориентации. Поэтому схемы прозвучивания дефектоскопных средств, как правило, всегда включают по два однотипных преобразователя (Н и О) каждого типа.

Обычно оператор-расшифровщик принимает решение об обнаружении дефектов в головке рельсов при срабатывании двух и более каналов дефектоскопического комплекса. При этом он руководствуется как результатами магнитного, так и ультразвуковых методов контроля. От анализируемых дефектов чаще всего срабатывает от 2 до 9 каналов одновременно, что позволяет четко выявлять дефекты на фоне возможных шумов и сигналов от конструктивных элементов рельсового пути (рис. 9). Случаи срабатывания всех 11 и даже 10 каналов комплекса на дефектном сечении крайне редки (всего 3 случая из 663 дефектов), как и принятие решений об обнаружении дефекта по срабатыванию одного канала.

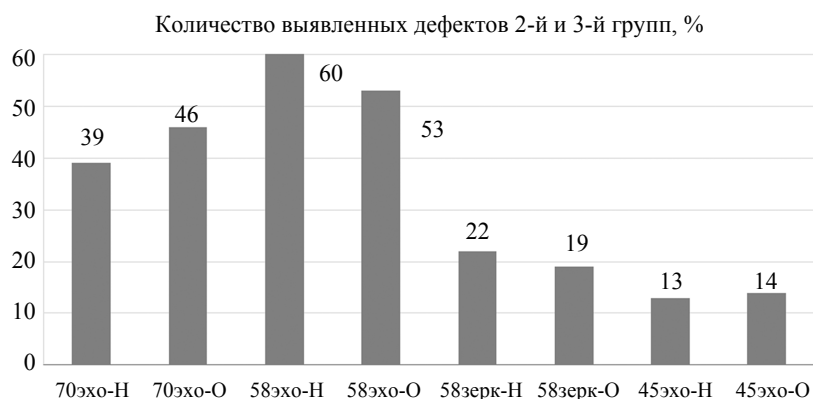


Рис. 8. Эффективность обнаружения дефектов отдельно наезжающими (Н) и отъезжающими (О) УЗ-каналами (всего 663 дефекта)

Fig. 8. The efficiency of detection of defects by approaching (H) and moving away (O) ultrasonic channels (total 663 defects)



Рис. 9. Распределение количества каналов дефектоскопического комплекса, одновременно среагировавших на дефекты головки рельсов

Fig. 9. The number of channels reacted to the defects of the rail head

Дополнительно выполнен анализ сигналов отдельно от поперечных и горизонтальных трещин в головке рельсов.

Как и ожидалось, наклонные зеркальные и эхоканалы с углами ввода $\alpha = 58, 70^\circ$ на 25-30 % эффективнее выявляют поперечные трещины, чем горизонтальные. И наоборот, преобразователи с углом ввода $\alpha = 0^\circ$ как эхо-, так и ЗТ-методами («0-Эхо» и «0-ЗТМ») на 12-25 % лучше реагируют на продольные расслоения.

Практически от всех (99 %) дефектов 3-й группы пропадают донные сигналы. Однако довольно низкий (44 %) показатель выявляемости горизонтальных расслоений эхоканалом преобразователя $\alpha = 0^\circ$ вызывает определенные вопросы. Очевидно, это объясняется тем, что на вагонах-дефектоскопах зону действия ВРЧ (временной регулировки чувствительности) часто устанавливают достаточно большой (протя-

женной), что является некорректной настройкой и может привести к пропуску дефектов в головке рельсов.

Анализируя фото принудительных доломов опасных дефектов, изъятых на рассматриваемом полигоне, можно отметить, что глубина залегания дефектов (точнее их верхней кромки) в головке лежит в диапазоне 2...15 мм (рис. 10), а значит, все эти дефекты могут быть выявлены магнитным методом НК.

Длину (протяженность) горизонтальных трещин с достаточной для практики точностью можно измерять непосредственно на дефектограмме по длительности пропадающего сигнала над ними. На рис. 11 видно, что более 95 % горизонтальных расслоений имеют протяженность от 25 до 180 мм. Продольные трещины протяженностью от 190 до 300 мм встречаются весьма редко.

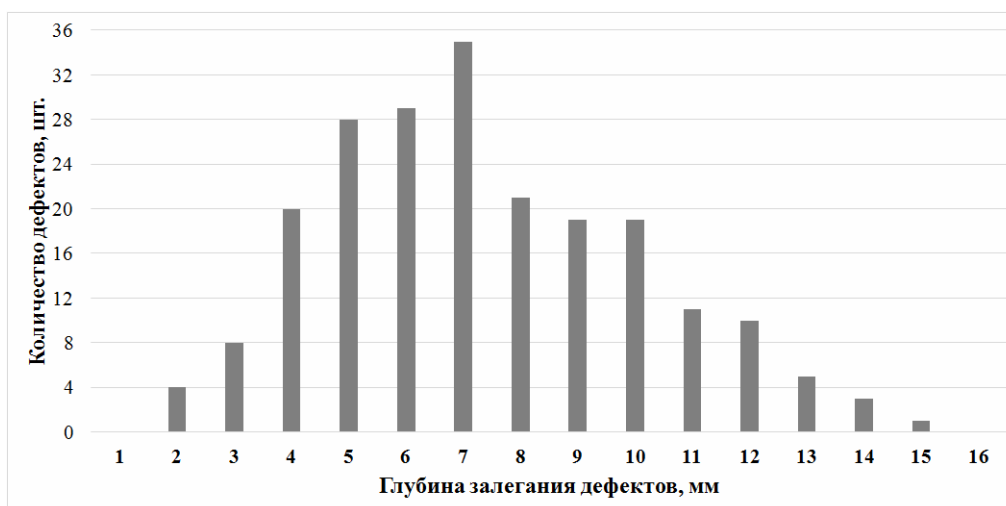


Рис. 10. Диапазон глубин залегания дефектов в головке рельсов (всего 213 дефектов)

Fig. 10. The depth range of defects in the rail head (total 213 defects)

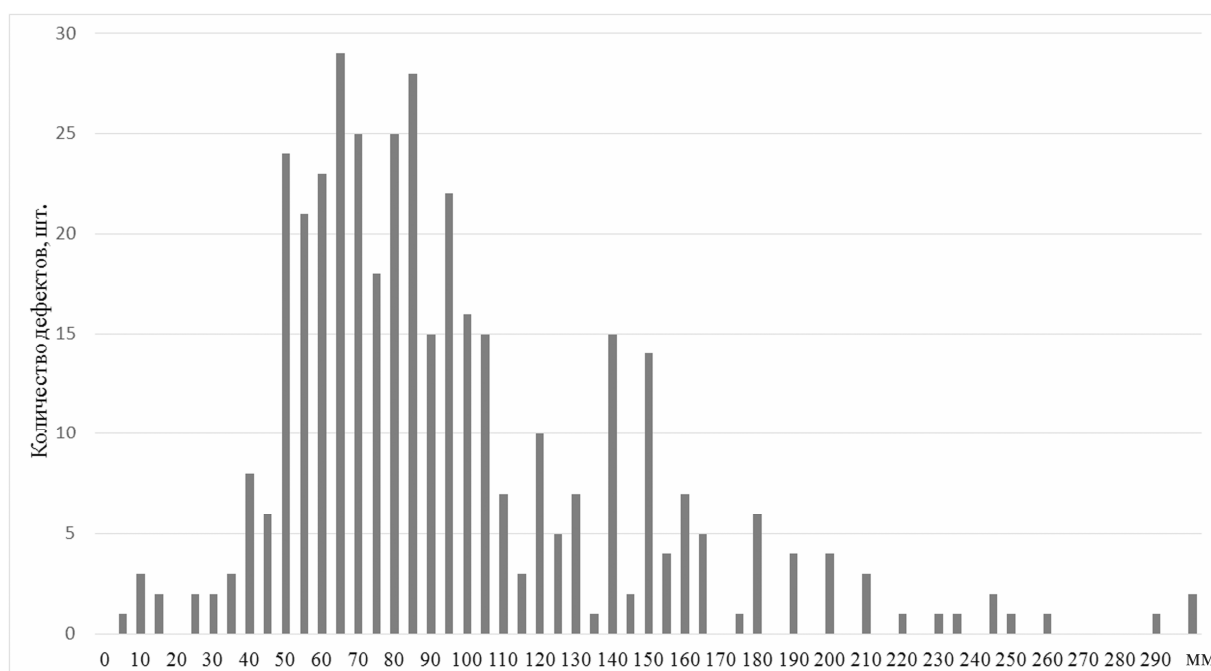


Рис. 11. Протяженность горизонтальных расслоений в головке рельсов, мм (всего 396 дефектов)

Fig. 11. The length of horizontal cracks in the rail head, mm (total 396 defects)

Выполненный анализ позволяет сделать вывод, что только комплексное применение УЗ- и МД-методов обеспечивает наиболее полное и достоверное обнаружение дефектов в головке рельсов. Игнорирование магнитного метода контроля (во многих действующих вагонах-дефектоскопах магнитный канал не работает из-за отсутствия системы намагничивания) может привести к снижению эффективности контроля более чем на 25 %.

Выводы

1. По данным практики контроля еще раз подтверждено, что только использование не-

скольких методов (магнитного, ультразвуковых методов отражения и прохождения сигналов) может гарантировать надежное обнаружение разноориентированных и сложных дефектов в головке рельсов.

2. Впервые проанализирован и оценен вклад (эффективность) каждого из каналов дефектоскопических комплексов при обнаружении дефектов в головке рельсов. Выявлено, что ни один из ультразвуковых каналов не обеспечивает обнаружение всех рассматриваемых дефектов (только 73 % дефектов обнаружены самым эффективными УЗ-каналами

с углами ввода 58° , работающими по эхометоду).

3. Достаточно низкие (33-73 %) показатели обнаружения дефектов наклонными УЗ-каналами, по-видимому, связаны с тем, что около 80 % исследуемых дефектов в головке рельсов имели горизонтальную ориентацию (естественно, эти каналы выявляют продольные дефекты намного хуже, чем поперечные трещины).

4. Магнитный метод с активной системой намагничивания помогает обнаруживать более 90 % дефектов в головке рельса. Отказ от магнитных каналов с активным намагничиванием рельсов в диагностических комплексах приводит к снижению надежности и достоверности контроля рельсов.

5. Наличие магнитного канала с активной системой намагничивания позволяет дополнительно обнаруживать на 26 % дефектов больше, чем при его отсутствии.

6. При дальнейшем развитии дефектоскопических систем необходимо развивать методы, позволяющие более надежно обнаруживать дефекты в головке рельсов продольной (горизонтальной) ориентации, причем крайне важно выявлять и сложные дефекты, когда под расслоениями одновременно развиваются опасные поперечные трещины.

Библиографические ссылки

1. Марков А. А., Кузнецова Е. А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Кн. 2. Расшифровка дефектограмм. СПб. : Ультра Принт. 2014. 325 с.

2. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Булдакова, Л. В. Гущина // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 2. С. 13–23.

3. Муравьев В. В., Тапков К. А., Леньков С. В. К вопросу контроля остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочненных рельсах // Дефектоскопия. 2018. Т. 54, № 10. С. 3–9.

4. Wang P., Gao Y., Tian G.Y., Wang H. Velocity effect analysis of dynamic magnetization in high speed magnetic flux leakage inspection. *NDT&E International*, 2014, vol. 64, pp. 7-12.

5. 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.

6. Марков А. А., Максимова Е. А. Дополнительный признак дефекта при ультразвуковом контроле рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 10. С. 2–8.

7. Антипов А. Г., Марков А. А. Оценка глубины выявления поперечных трещин магнитодинамиче-

ским методом в дефектоскопии рельсов // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 57–68.

8. Марков А. А., Антипов А. Г., Москвин Р. С. Опыт применения магнитодинамического метода контроля рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 12. С. 20–24.

9. Костенко А. А. Практическое применение магнитодинамического метода контроля рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 10. С. 16–18.

10. Муравьев В. В., Байтеряков А. В. Влияние эксплуатационной грузонапряженности рельсов на акустические структурные шумы // Дефектоскопия. 2016. Т. 52, № 11. С. 50–58.

11. 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.

12. 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.

References

1. Markov A.A., Kuznetsova E.A. *Rasshifrovka defektogram* [Decoding of defectograms]. St. Petersburg, Ultra Print Publ. 2014, 325 p. (in Russ.).

2. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Buldakova I.V., Gushchina L.V. [Investigations of the Structural and Strain-Stress State of the Rails of Current Production by the Acoustic Elasticity Method]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 13-23 (in Russ.).

3. Murav'ev V.V., Tapkov K.A., Len'kov S.V. On the Question of Monitoring Residual Stresses in Selectively Heat-Strengthened Rails. *Russian Journal of Nondestructive testing*, 2018, vol. 54, no. 10, pp 675-681. DOI 10.1134/S106183091810008X.

4. Wang P., Gao Y., Tian G.Y., Wang H. [Velocity effect analysis of dynamic magnetization in high speed magnetic flux leakage inspection]. *NDT&E International*, 2014, vol. 64, pp. 7-12.

5. 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.

6. Markov A.A., Maksimova E.A. [Additional defect parameter for ultrasonic inspection of rails]. *Put' i putevoe khozyaistvo*, 2018, no 10, pp. 2-8 (in Russ.).

7. Antipov A.G., Markov A.A. [Evaluation of the detection depth of transverse cracks by the magnetic method in rail inspection]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, no. 8, pp. 57-68 (in Russ.).

8. Markov A.A., Antipov A.G. Moskvin R.S. [Experience of using the magnetic method of control of rails]. *Put' i putevoe khozyaistvo*, 2015, no. 12, pp. 20-24 (in Russ.).

9. Kostenko A. A. [Practical application of the magnetodynamic method of control of rails]. *Put' i putevoe khozyaistvo*, 2016, no. 10, pp. 16-18 (in Russ.).

10. Murav'ev V.V., Baiteryakov 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.

11. 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.).

12. 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.).

Analysis of the Efficiency of Ultrasonic and Magnetic Channels of Flaw Detection Systems

A.A. Markov, DSc in Engineering, Radioavionica JSC, Saint Petersburg, Russia

E.A. Maksimova, Radioavionica JSC, Saint Petersburg, Russia

The paper shows the capabilities of diagnostic systems located on the flaw detector cars, while monitoring rails at speeds up to 60 km/h. The effectiveness of different channels of complexes is shown that implement ultrasonic methods of reflection and mirror through transmission method in identifying transverse and longitudinal cracks in the rail head.

A significant database of real rail damage is analyzed. It is shown that about 80% of defects in the rail head are cracks of longitudinal orientation, which are very uncertainly detected by inclined ultrasonic channels.

For the first time, the contribution of each of the ultrasonic and magnetic channels of defectoscopic complexes to the detection of defects in the rail head has been evaluated. None of the ultrasound channels separately provides the detection of all considered damages. The magnetic control method (MFL) with the active magnetizing system of rails when searching for defects in the rail head at depths of up to 20 - 22 mm is not inferior to ultrasonic methods of control in its efficiency. The presence of a magnetic channel with an active magnetization system makes it possible to additionally detect 26% more defects than in its absence.

The analysis of signals from real defects confirmed once again that only the integrated application of ultrasonic and magnetic control methods ensures reliable and timely detection of dangerous defects in rails.

Keywords: rails, defects, diagnostic complex, ultrasound, echo signal, magnetic method (MFL), multichannel control.

Получено 11.03.2019

Образец цитирования

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. DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32.

For Citation

Markov A.A., Maksimova E.A. [Analysis of the efficiency of ultrasonic and magnetic channels of flaw detection systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 22-32 (in Russ). DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32.