

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ РЕЛЬСОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

© 2019 г. А.С. Шлеенков^{1,*}, О.А. Булычев¹, А.Б. Пастухов¹, С.А. Шлеенков¹

¹Институт физики металлов им. Мухомова УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург,
ул. Софьи Ковалевской, 18

*E-mail:shleenkova@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 12.07.2019; после доработки 16.08.2019

Принята к публикации 11.10.2019

Разработана технология выявления поверхностных дефектов в головке и подошве рельса магнитным методом с использованием тонкопленочных магниторезистивных датчиков поля. Установка состоит из системы для перемещения рельса в продольном направлении, намагничивающего соленоида, кассет с датчиками поля для контроля головки и подошвы рельса, электромагнита постоянного тока с накладными полюсными наконечниками, «роботизированного» блока перемещения в поперечном направлении с дополнительной кассетой для выявления длинномерных дефектов (по всей длине рельса). Электрические сигналы датчиков передаются на аналого-цифровой преобразователь и обрабатываются в цифровом виде. Показана возможность обнаружения всех, предусмотренных нормативно-технической документацией ОАО «РЖД», поверхностных дефектов.

Ключевые слова: тонкопленочный магниторезистивный датчик, рельс, магнитная дефектоскопия, электромагнит, соленоид, аналого-цифровой преобразователь.

DOI: 10.1134/S0130308219120066

ВВЕДЕНИЕ

Неразрушающий контроль, направленный на своевременное обнаружение дефектов рельсов в процессе их эксплуатации, актуален на всех железных дорогах мира. Основным методом обнаружения дефектов во всех странах является ультразвуковой с контактным способом ввода упругих колебаний. В дополнение к ультразвуковому методу в некоторых случаях используют индукционный метод, который позволяет выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты [1—3].

По статистике ОАО «РЖД», на железных дорогах эксплуатируются более 67,5 тысяч рельсов с поверхностными повреждениями. В основном, это рельсы с пробуксовками, отслоениями и выкрашиваниями металла на поверхности катания, вызванные как недостатками технологии изготовления рельсов, так и воздействием подвижного состава.

Согласно публикациям ВНИИЖТ [4], на отечественных железных дорогах в последние годы поперечные трещины составляют всего 20 % от всех дефектов в головке рельсов, 80 % дефектов головки являются продольными трещинами, залегающими в поверхностных и подповерхностных зонах на глубине 5—15 мм.

Поскольку продольные дефекты обусловлены, как правило, нарушениями технологии производства рельсов на заводах-изготовителях и учитывая, что по требованиям [5] любой дефект в головке рельса в виде продольной трещины глубиной более 8 мм (или протяженностью более 70 мм независимо от глубины) считается опасным, то задача своевременного выявления подобных дефектов является актуальной. Важность выявления продольных поверхностных дефектов рельсов в процессе производства отмечена также в ГОСТ Р 51685—2013 [6] и СТО РЖД 1.11.004—2009 [7].

Действующие стандарты устанавливают универсальный эквивалентный искусственный дефект, по которому должны настраиваться существующие и будущие средства контроля для выявления всех недопустимых дефектов.

ГОСТ Р 51685—2013 предписывает применять для неразрушающего контроля (НК) головки и подошвы рельса ультразвуковой (УЗК), магнитный (МД) и вихретоковый (ВТ) методы. Метод должен выбираться с учетом характера обнаруживаемых дефектов, технических и стоимостных характеристик дефектоскопов и других существенных факторов. При производстве рельсов обычно используют ультразвуковой метод НК, однако могут применяться и другие методы, в том числе магнитный и вихретоковый.

Контроль уложенных в путь рельсов имеет свою специфику. Большинство железных дорог России продолжительное (3 и более месяцев) время эксплуатируется при низких и крайне низких температурах (ниже минус 30° С). Очевидно, что в этих условиях реализовать стабильный ввод упругих колебаний при контактном ультразвуковом контроле весьма сложно. Также большую роль

играет ориентация дефекта к направлению озвучивающего его ультразвукового луча. Частичным решением этой проблемы является более широкое использование магнитодинамического метода контроля, который должен быть реализован во всех мобильных средствах дефектоскопии (вагонах-дефектоскопах и дефектоскопических автомотрисах). Применяемая в вагонах-дефектоскопах магнитодинамическая система (с электромагнитами на осях колесных пар и вводом магнитного потока в рельс через пятно контакта «колесо-рельс») позволяет надежно обнаруживать поверхностные и подповерхностные дефекты головки рельса глубиной до 6—8 мм при любых климатических условиях на высоких скоростях (до 80 км/ч).

Недостатком ВТ метода [8] является относительно малый рабочий зазор, а также повышенная чувствительность к колебаниям зазора между датчиком и рельсом. В ряде случаев предпочтительным является применение метода магнитной дефектоскопии. Как показала практика, магнитным методом обнаруживается более 90 % опасных дефектов головки рельса. При этом выявляется 94 % поперечных трещин и 91 % — продольных трещин. Выявление продольных трещин при намагничивании вдоль рельса объясняется тем, что продольные трещины развиваются, как правило, под некоторым углом к продольной оси рельса. Поскольку такие трещины имеют значительную протяженность (от 25 до 300 мм), то их эффективное поперечное сечение оказывается достаточным для формирования потока рассеяния с достаточно большой поперечной составляющей.

Следует отметить, что благодаря глубокому проникновению при квазистатическом намагничивании и задаваемой направленности магнитного потока в изделия магнитная дефектоскопия способна обнаруживать такие дефекты, как закаты, расслоения и другие протяженные поверхностные дефекты, ориентированные вдоль направления проката, которые не выявляются другими методами дефектоскопии.

Однако средства магнитной дефектоскопии, применяемые для контроля рельсов, уложенных в путь [3], не могут быть напрямую использованы для контроля рельсов в процессе их производства (различные способы сканирования, различные зоны и периметры контроля и т.д.). В связи с этим задача разработки технологии и средств магнитной дефектоскопии рельсов на заводах-изготовителях становится очень актуальной.

В данной работе разработана и исследована многоканальная магниторезистивная система измерения и обработки сигнала для макетной установки по выявлению поверхностных дефектов на рельсе магнитным способом.

УСТРОЙСТВО ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Внешний вид лабораторной установки показан на рис. 1. Для определения работоспособности и технических характеристик установки был использован отрезок рельса Р65, на головке и подошве которого имелись поверхностные дефекты, выполненные в соответствии с требованиями СТО РЖД 1.11.004-2009 (первый образец), естественный дефект типа «плена» (второй образец), а также дефекты типа «закат», «расслой» и «задир» (третий образец). Скорость продольного перемещения рельса в лабораторных условиях составляла 0,5 м/с.



Рис. 1. Внешний вид лабораторной установки для дефектоскопии железнодорожных рельсов магнитным методом.

Структурная схема установки приведена на рис. 2. Установка состоит из двух модулей: модуль ручного сканирования при продольном перемещении рельса и намагничивании соленоидом (пер-

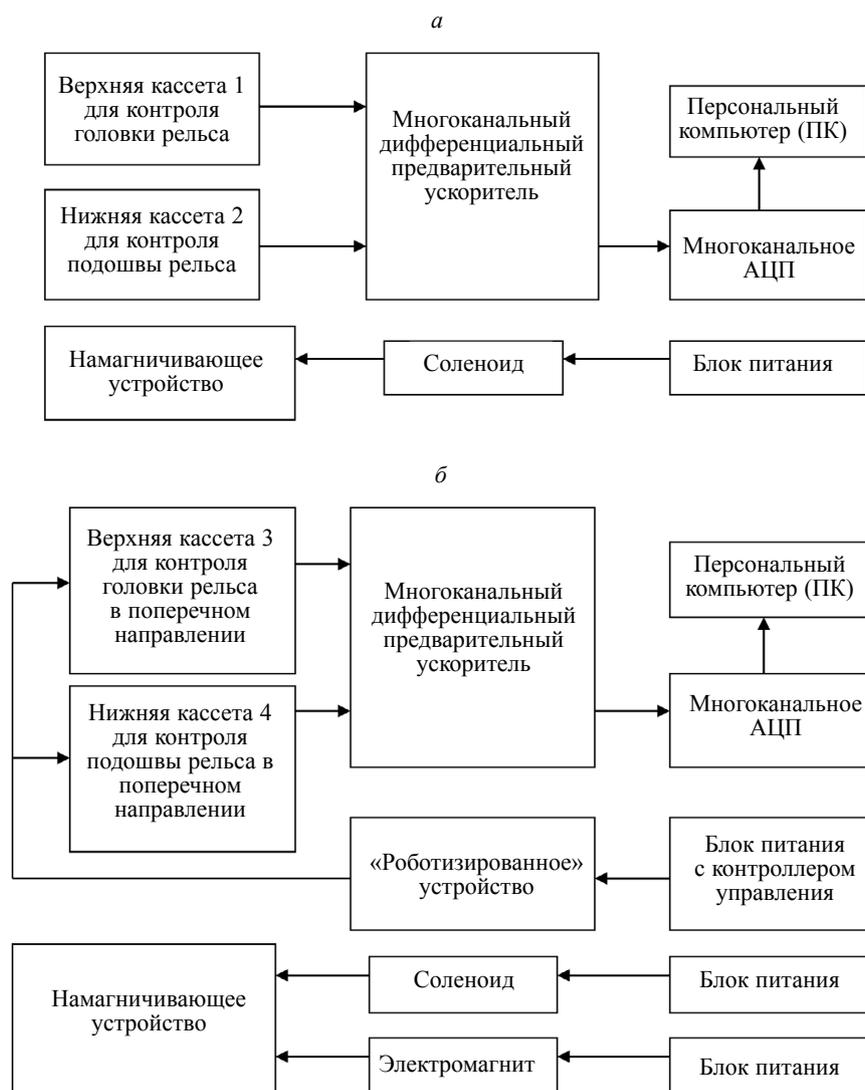


Рис. 2. Структурная схема лабораторной установки:
a — первый модуль; *б* — второй модуль.

вый модуль (*a*)); модуль сканирования с помощью механизма поперечного перемещения измерительных датчиков и комбинированным намагничиванием (второй модуль (*б*)).

Первый модуль состоит из соленоида для продольного намагничивания и двух кассет с преобразователями, предназначенных для дефектоскопии головки рельса (верхняя кассета 1) и его подошвы (нижняя кассета 2).

Второй модуль состоит из намагничивающего устройства, которое включает в себя соленоид для продольного намагничивания и электромагнит постоянного тока для поперечного намагничивания, механизм (линейный двигатель и контроллер управления [9]) для перемещения дополнительных кассет 3 и 4 с датчиками для сканирования головки и подошвы рельса в поперечном направлении.

Система измерения состоит из магниторезистивных датчиков поля, собранных в кассеты, многоканального предварительного дифференциального усилителя, многоканального АЦП и персонального компьютера для сбора, отображения и сохранения результатов экспериментов в цифровом виде.

Датчики, фиксирующие поля рассеяния от дефектов, представляют собой однокристалльные тонкопленочные матричные преобразователи магнитного поля [10—12]. Аналогичные датчики уже применяются в промышленных установках для дефектоскопии труб [13—15]. Датчики изготовлены в виде прямоугольных пластин из поликора размером 12×8×2 мм. На одну из сторон

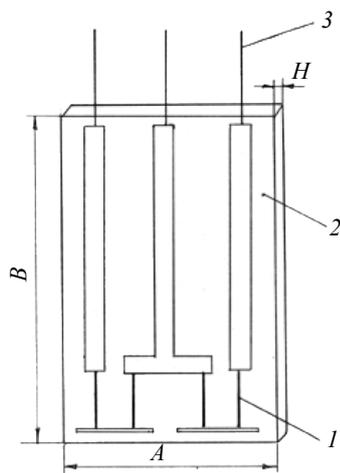


Рис. 3. Схема соединения магниторезисторов на пластине датчика:
1 — магниторезисторы; 2 — подложка; 3 — внешние выводы.

нанесена тонкая ферромагнитная пленка, образующая четыре магниторезистора, соединенных в схему, показанную на рис. 3. Данная схема образует полумост магниторезисторов. Для создания полного моста необходимо два датчика. Пластины датчиков склеены тыльными сторонами, электрически соединены в мост и выводы через жгут припаяны к общему разъему каждого матричного преобразователя. МП ориентированы вдоль продольной оси рельса. При таком электрическом соединении и пространственном расположении достигается максимально высокая чувствительность к полям рассеяния от дефектов. Электрический сигнал с датчиков подается на многоканальный дифференциальный предварительный усилитель, а далее на многоканальный АЦП E14-440 [16], который имеет 16 дифференциальных входов с частотой преобразования 400 кГц, подключенных к ПК через

интерфейс USB. Цифровые данные с АЦП передаются через USB в ПК со специализированным программным обеспечением.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Первый образец с искусственными поверхностными дефектами, изготовленными в соответствии с требованиями СТО РЖД 1.11.004—2009 (контроль методом «В»), исследован с помощью первого модуля установки. При продольном перемещении рельса и его намагничивании соленоидом проводились измерения выходного напряжения датчиков магнитного поля, ориентированных магниточувствительными осями по нормали к поверхности рельса.

Дефектограммы от искусственных дефектов, полученные в ручном режиме при продольном намагничивании соленоидом (ток соленоида 4 А), показаны на рис. 4. Как видно из приведенных данных, разработанная установка имеет достаточную чувствительность для обнаружения указанных дефектов. Как и следовало ожидать при таком направлении намагничивания, чувствительность к продольным дефектам в 3-4 раза меньше, чем к поперечным, однако достаточно большое соотношение сигнал/шум (более 10) позволяет обнаруживать и продольные дефекты.

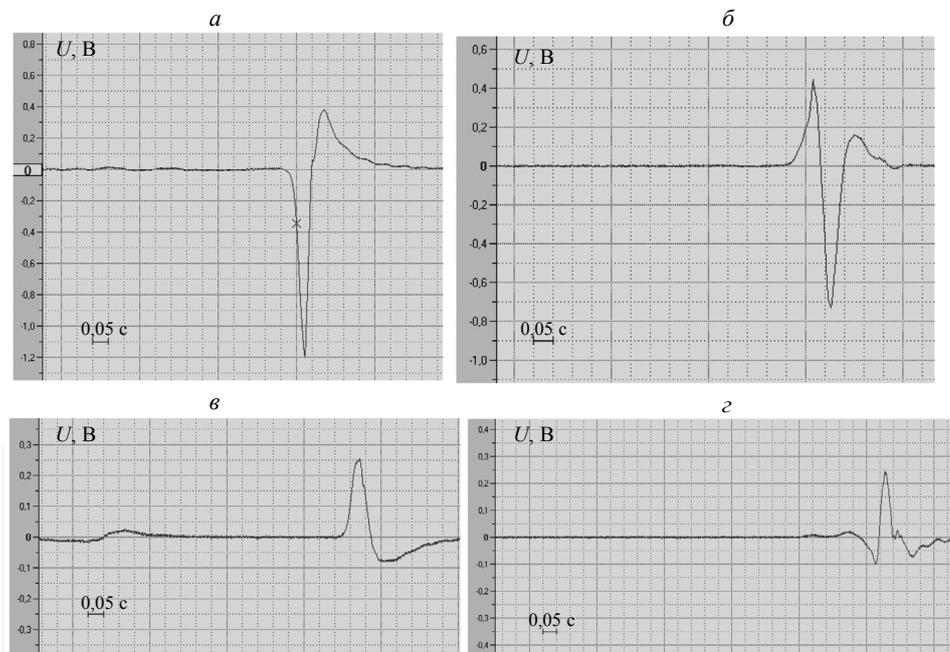


Рис. 4. Дефектограммы искусственных дефектов: поперечный дефект длиной 10 мм, глубиной 1,5 мм (а); поперечный дефект длиной 20 мм, глубиной 1,0 мм (б); продольный дефект длиной 10 мм, глубиной 1,5 мм (в); продольный дефект длиной 20 мм, глубиной 1,0 мм (г).

Таблица 1

Зависимость сигнала дефектоскопа от расстояния между датчиками поля и поверхностью при токе соленоида 4 А

| Расстояние между датчиками поля и поверхностью рельса, мм | 3 | 5 | 7 |
|---|------|------|------|
| Сигнал от продольного дефекта, В | 0,25 | 0,20 | 0,15 |
| Сигнал от поперечного дефекта, В | 1,2 | 0,7 | 0,4 |

Важным вопросом является возможность обнаружения дефектов при различных расстояниях между датчиками поля и поверхностью контролируемого объекта. В табл. 1 приведены зависимости сигнала дефектоскопа от зазора между датчиком и поверхностью головки рельса. Как видно из таблицы, с изменением зазора чувствительность дефектоскопа к поперечным дефектам уменьшается значительно сильнее, чем к продольным.

Возможность обнаружения дефектов типа «плена» на головке рельса (второй образец) также определялась с помощью первого модуля. На рис. 5 показана дефектограмма от всех имеющихся на образце плен.



Рис. 5. Дефектограммы плен № 1, 2, 3 (образец № 2).

Плену № 1 (максимальный сигнал слева) можно визуально сравнить с Т-образным, комбинированным продольно-поперечным искусственным дефектом. Плена № 1 в несколько раз больше, чем плены № 2 (средняя) и № 3 (справа). Плены № 2 и № 3 не обнаруживаются визуально, однако их существование было установлено сначала магнитным, а затем подтверждено вихретоковым и оптическим (микроскоп) методами.

Для повышения выявляемости дефектов различных типов и ориентации целесообразно использовать комбинированное намагничивание. На рис. 6 сопоставлены дефектограммы искус-

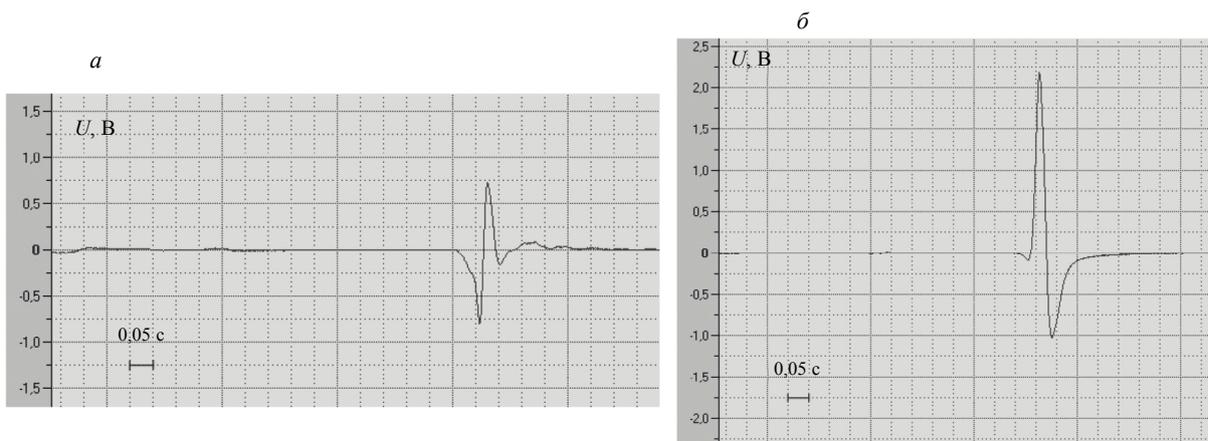


Рис. 6. Дефектограммы, полученные при комбинированном намагничивании рельса (продольно соленоид, ток 4 А и поперечно электромагнит, ток 1,2 А):

а — искусственный продольный дефект протяженностью 20 мм и глубиной 1 мм, *б* — естественный дефект «плена» № 3.

ственного и естественного дефектов, полученные при комбинированном намагничивании. Из сопоставления рис. 4г и рис. 6а, а также рис. 5 и 6б следует, что комбинированное намагничивание в 5-15 раз повышает соотношение сигнал/шум для указанных дефектов.

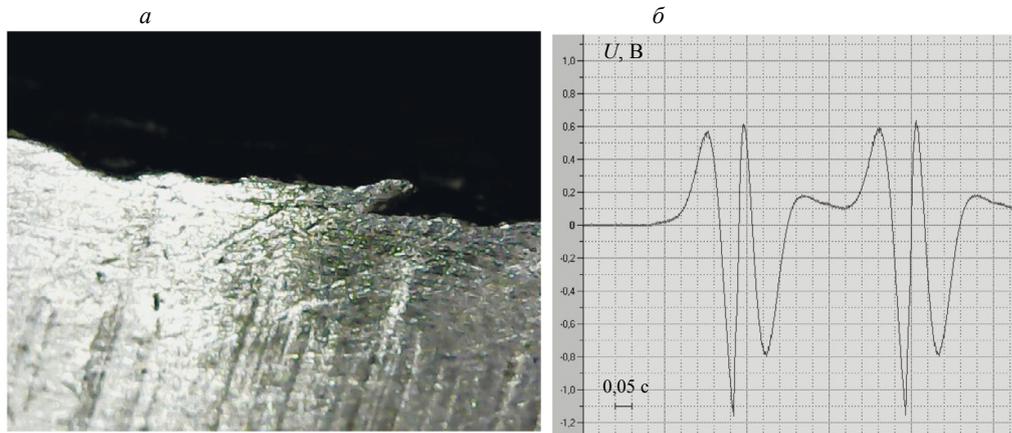


Рис. 7. Естественный дефект типа «закат»:

а — фотография торца рельса с дефектом типа «закат» (увеличение $\times 20$); б — дефектограмма дефекта при продольном намагничивании соленоидом (ток 4 А) и поперечном — электромагнитом (ток 1,2 А).

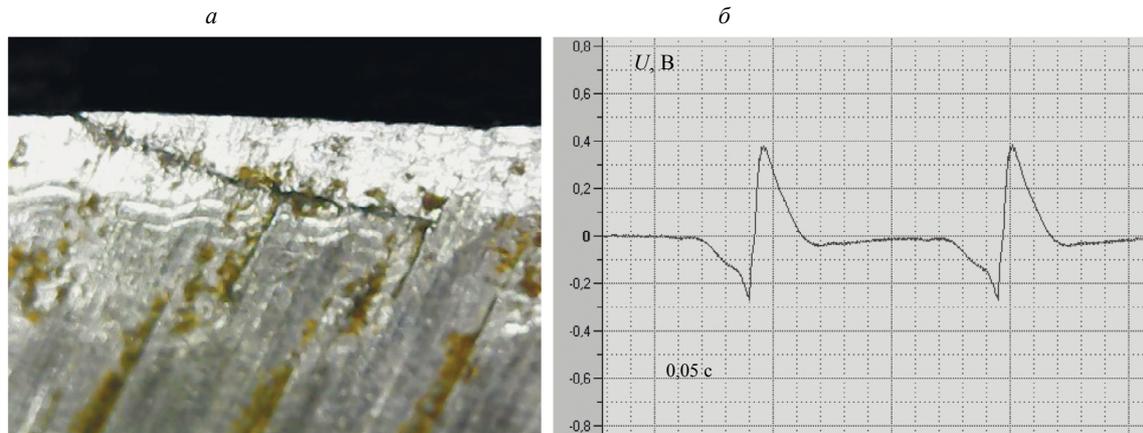


Рис. 8. Естественный дефект типа «расслоение»:

а — увеличенная ($\times 20$) фотография торца рельса, раскрытие трещины не более 10 мкм, длина 3 мм; б — дефектограмма дефекта при комбинированном намагничивании: продольное — соленоид (ток 4 А) и поперечное — электромагнит (ток 1,4 А).

При комбинированном намагничивании для выявления протяженного (по всей длине рельса) дефекта типа «закат» (рис. 7а), измерялся сигнал магниторезистивного датчика во время его поперечного перемещения над головкой рельса. Высота выступа «заката» над поверхностью головки рельса составляет около 0,3 мм. Видно, что по характерному изменению сигнала возможно обнаружение дефектов такого типа.

На рис. 8а приведено фото торца рельса с дефектом, который был определен как «расслоение с выходом на поверхность»¹. Этот дефект проходит по всей длине рельса, но отличается малой длиной (3 мм) и малым раскрытием (не более 10 мкм). Размеры дефекта и ориентация тела дефекта вдоль силовых линий намагничивающего поля обуславливают более слабый сигнал от него, чем сигналы от других дефектов. Однако, как видно из рис. 8б, и этот дефект может быть выявлен с помощью разработанной установки.

Наличие на рельсе всех указанных выше дефектов было дополнительно подтверждено с помощью вихретокового дефектоскопа ВД-213.1 при ручном сканировании поверхности исследуемого рельса.

¹Следует отметить, что дефекты типа «расслоение» не входят в таблицу дефектов, подлежащих выявлению согласно нормативам ОАО РЖД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и изготовлена лабораторная установка для дефектоскопии поверхности железнодорожных рельсов. Использование продольного и комбинированного намагничивания, а также многоэлементной измерительной системы с расположенными вблизи головки и подошвы рельса магниторезистивными датчиками поля позволяет обнаруживать все предусмотренные нормативно-технической документацией ОАО РЖД дефекты. Разработанная установка может быть встроена в технологическую линию изготовления железнодорожных рельсов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков А.А. Зарубежные технологии НК // Путь и путевое хозяйство. 2010. № 9. С. 11—21.
2. Костенко А.А. Практическое применение магнитодинамического метода контроля рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 10. С. 16—18.
3. Antipov A. G., Markov A. A. Detectability of Rail Defects by Magnetic Flux Leakage Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. № 4. С. 277—285.
4. Шур Е.А., Борц А.И., Сухов А.В., Абдурашитов А.Ю. и др. Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 3. С. 3—9.
5. Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острорезистивных рельсов». Утв. ОАО «РЖД» от 23.10.2014 г. № 2499р. 9 р.
6. ГОСТ Р 51685—2013 Общие технические условия на рельсы железнодорожные. Москва: Стандартинформ, 2014.
7. СТО РЖД 1.11.004-2009 Контроль неразрушающий. Рельсы железнодорожные. Общие технические требования к приемочному контролю. Москва, ОАО «РЖД», 2009.
8. Дефектоскоп вихретоковый НПП «Промприбор». [Электронный ресурс] URL: <https://www.ndtprmpribor.ru>
9. Линейные шаговые двигатели (актуаторы), программируемые блоки управления и программное обеспечение. [Электронный ресурс] URL: <http://www.electropivod.ru>
10. Булычев О.А. Магниторезистивный преобразователь для считывания информации с магнитных носителей // Патент РФ № 2175455. Бюлл. Изобретений. № 30. 27 октября 2001 г.
11. Булычев О.А., Шлеенков А.С. Двухкомпонентный матричный преобразователь магнитного поля // Патент на изобретение № 2290654. Оpubл. 27.12.2006. Бюлл. № 36.
12. Васильева Н.П., Касаткин С.И., Муравьев А.М. Тонкопленочные магниторезистивные датчики магнитного поля и области их применения // Датчики и Системы. 1999. № 1. С. 29—36.
13. Шлеенков А.С., Булычев О.А., Шлеенков С.А. Установка УМД-101М для автоматизированного магнитного контроля качества электросварных труб по всему объему // Дефектоскопия. 2008. № 8. С. 76—82.
14. Булычев О.А., Шлеенков С.А., Сенин В.М., Шлеенков А.С., Полежаев Л.А. Установка УМД-104М для контроля насосно-компрессорных труб повторного применения // Дефектоскопия. 2015. № 11. С. 3—13.
15. Шлеенков А.С., Булычев О.А., Шлеенков А.С., Полежаев Л.А., Панов Д.С., Худяков П.Г. Установка УМД-121 для автоматизированного магнитного контроля качества сварного шва прямошовных электросварных труб диаметром (168—530) мм // Дефектоскопия. 2013. № 5. С. 3—14.
16. Модули аналого-цифрового преобразования на шину USB и программное обеспечение. [Электронный ресурс] URL: <http://www.lcard.ru>