

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПЕРЬЯХ ПОДОШВЫ РЕЛЬСОВ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

© 2024 г. А.А. Марков¹, В.В. Мосягин¹, А.Г. Антипов², Г.А. Иванов^{3,*}

¹АО «Радиоавионика», Россия 190005 Санкт-Петербург, Троицкий просп., 4б

²Санкт-Петербургский государственный университет, Россия 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

³Санкт-Петербургский горный университет, Россия 199106 Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., 2
E-mail: *george97ivanov@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.08.2023; после доработки 11.12.2023

Принята к публикации 12.12.2023

Исследована возможность обнаружения дефектов в виде поперечных трещин в перьях подошвы при сплошном (непрерывном) контроле рельсов при их эксплуатации. В качестве альтернативы ультразвуковому выбран магнитный метод контроля. Выполнено компьютерное моделирование, по результатам которого разработан и изготовлен действующий макет системы намагничивания и регистрации сигналов контроля. В лабораторных условиях проведены экспериментальные исследования обнаружения моделей трещин в перьях подошвы рельсов. Исследования подтвердили результаты компьютерного моделирования и доказали возможность обнаружения таких моделей трещин. Оценены минимальные размеры обнаруживаемых моделей трещин в подошве рельсов в зоне рельсовых скреплений и между ними.

Ключевые слова: поперечная трещина, рельсовая дефектоскопия, магнитный метод, метод рассеяния магнитного потока, подошва рельса.

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY DETECTION OF DEFECTS IN RAIL FOOT BY MFL METHOD

A.A. Markov¹, V.V. Mosyagin¹, A.G. Antipov², G.A. Ivanov^{3,*}

¹JSC «Radioavionica», Russia 190005 St.Petersburg, Troitskiy Avenue, 4b

²St.Petersburg State University, Russia 199034 St.Petersburg, University embankment, 7/9

³St. Petersburg Mining University, Russia 199106 St Petersburg, 2, 21st Line
E-mail: *george97ivanov@yandex.ru

The article investigates the possibility of detecting defects in the form of transverse cracks in the rail foot at continuous inspection of rails during their operation. Magnetic method is chosen as an alternative to ultrasonic inspection. Computer modeling was carried out, based on the results of which a working model of the magnetization system and registration of control signals was developed and manufactured. Experimental studies of detection of crack models in the rail foot were carried out in laboratory conditions. The studies confirmed the results of computer modeling and proved the possibility of detecting such crack models. The minimum sizes of detectable crack models in rail foot in the zone of rail fasteners and between them have been estimated.

Keywords: transverse crack, rail flaw detection, magnetic method, magnetic flux leakage method, rail foot.

DOI: 10.31857/S0130308224010064

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы изломы рельсов на эксплуатируемых железнодорожных линиях ОАО «РЖД» чаще всего происходят из-за дефектов в подошве рельса (рис. 1). На железнодорожной сети до 30 % официально зафиксированных изломов рельсов произошли из-за развития дефектов в подошве рельса [1]. В основном, это трещины коррозионно-усталостного происхождения [2], имеющие форму сегмента и развивающиеся от нижней поверхности подошвы рельса. Перечисленные выше факты свидетельствуют, что известные способы и устройства не обеспечивают надежное и своевременное обнаружение указанных дефектов. Действительно, с помощью акустического вида неразрушающего контроля ультразвуковыми (у.з.) дефектоскопами, широко используемых на сети ОАО «РЖД», удается выявлять трещины только в центральной части подошвы, в проекции шейки рельса. Минимальная высота сегмента трещины, подлежащей при сплошном контроле выявлению в проекции шейки, по нормативам составляет 6 мм.

Известные технические решения обнаружения дефектов в подошве эксплуатируемых рельсов в основном ориентированы на использование у.з. методов контроля. Эти решения можно разделить



Рис. 1. Пример излома рельса из-за поперечной трещины, развивающейся в пере подошвы.

на три группы по расположению пьезопреобразователей (ПЭП) на сканируемых поверхностях контролируемого рельса:

- со сканированием с поверхности перьев подошвы [3];

- со сканированием с поверхности катания [4—8];

- комбинированные, с использованием ПЭП, озвучивающих сечения перьев подошвы путем перемещения по поверхности катания (с головки рельса) и по поверхностям перьев подошвы [9, 10].

Решения [3, 4], базирующиеся на использовании контактных у.з. ПЭП, малоприменимы на практике из-за значительной загрязненности и неровности поверхностей перьев подошвы и больших объемов работ по их предварительной очистке¹. Поэтому эти решения можно отнести к способам, позволяющим осуществлять поиск дефектов на локальных участках рельсов (длиной от 0,2 до 1,5 м).

Способ сканирования с поверхности катания широко используется при сплошном контроле рельсов. Причем направить у.з. колебания с поверхности катания через шейку рельса в перья подошвы удастся как контактными ПЭП [4, 6], так и бесконтактными электромагнитоакустическими (ЭМА) преобразователями [5], и «специальными многослойными» фазированными решетками [7]. Все это требует излучения достаточно мощных зондирующих импульсов и приема искомых сигналов на повышенной чувствительности. Однако эффективно разделить принятые сигналы от потенциальных дефектов на фоне многочисленных отражений от коррозионных повреждений подошвы, возможных вмятин от клемм и подкладок рельсовых креплений практически не удастся.

Колесные у.з. преобразователи [8], адаптированные к поверхностям выкружки шейки и пера подошвы, являются перспективным вариантом сплошного сканирования перьев. Однако эта технология требует создания специальных узких колесных преобразователей с возможностью их размещения в ограниченном пространстве между шейкой рельса и габаритными элементами рельсовых креплений (клеммными болтами). При этом должна быть разработана и специальная механика, позволяющая оперативно снимать устройство с рельса при приближении поезда и при преодолении зон болтовых стыков и стрелочных переводов. Вопросы очистки поверхности от загрязнений и обеспечения стабильного акустического контакта между оболочкой у.з. колеса и поверхностью пера подошвы по-прежнему являются определенной проблемой, характерной для всех у.з. методов с контактным вводом колебаний.

Таким образом, известные технические решения на базе у.з. методов в настоящее время не позволяют осуществлять надежный поиск и обнаружение дефектов в перьях подошвы при сплошном сканировании.

¹Дополнительно операторы, имеющие опыт применения этих решений на практике, отмечают необходимость большого объема контактирующей жидкости (технического масла) для обеспечения приемлемого качества акустического контакта.

Альтернативным техническим решением задачи обнаружения дефектов в перьях подошвы рельсов может являться применение магнитного неразрушающего контроля. В соответствии с ГОСТ Р 55612—2013, магнитный неразрушающий контроль основан на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами намагниченного исследуемого объекта контроля. Данная технология успешно используется для выявления коррозионных повреждений обшивки судов при плановых ремонтах [11], контроле днищ резервуаров для хранения нефтепродуктов [12] и других изделий из ферромагнитных материалов.

При скоростном контроле рельсов совмещенными (магнитный и ультразвуковой методы) вагонами-дефектоскопами [13] используют для регистрации данных рассеяния магнитного потока над поверхностью катания рельса как индукционные датчики, так и датчики Холла. При контроле головки рельсов магнитным методом обеспечивается достаточно надежное обнаружение поперечных трещин [14] глубиной до 20 мм от поверхности катания рельса, а в отдельных случаях — и до 25 мм [15]. Эмпирически установлено, что при магнитном контроле рельсов, уложенных в путь, необходимо намагнитить объект контроля до уровня примерно 1,0—1,2 Тл [16].

Учитывая, что задача разработки системы намагничивания перьев подошвы является весьма сложной и полностью нерешенной в мире, предлагается поэтапный подход. На первом этапе рассматриваются только рельсы типов Р65 или Р75 и контроль подошвы рельсов вне зон болтовых стыков и стрелочных переводов. Такой подход вполне оправдан, так как известно, что указанные типы рельсов на главных путях ОАО «РЖД» составляют более 80 %, а количество болтовых стыков, благодаря планомерному внедрению сварных стыков, неуклонно снижается.

В связи с этим в данной работе (в качестве альтернативы ультразвуковому контролю ручными дефектоскопами) исследуются вопросы возможности применения магнитных методов контроля для обнаружения поперечных трещин в перьях подошвы рельсов при сплошном или выборочном контроле. Как известно, магнитные методы контроля, в отличие от акустических, менее требовательны к состоянию поверхности изделий, температуре контроля, не требуют систем подачи и обогрева контактирующей жидкости.

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Важным условием реализации магнитного метода является наличие эффективной системы намагничивания объекта контроля.

Ширина подошвы наиболее распространенного в России рельса Р65 составляет 150 мм, а высота пера подошвы — 11,25 мм [17], что незначительно отличается от размеров европейских рельсов типа UIC60 (ширина подошвы 150 мм, высота пера подошвы 11,5 мм [18]). В общем случае, при использовании редкоземельных магнитов (Nd—Fe—В) с индукцией 1,2 Тл [19] или электромагнитов условие намагничивания подошвы рельсов до уровня, при котором происходит вытеснение магнитного потока на несплошностях металла, реализуемо. Естественно, при этом полюса магнитной системы должны быть расположены непосредственно на перьях подошвы рельса — единственно доступных для сканирования поверхностях.

Возможность использования постоянных магнитов для намагничивающей системы следует признать неперспективной ввиду непростой конструкции системы размыкания магнитной цепи и сложности реализации процедуры оперативного съема магнитов с поверхности рельса. Использование электромагнита требует достаточно мощного источника тока (до 20 А), но все же позволяет решить проблемы снятия магнитного поля при съеме системы с рельса.

Одним из способов определить, какие дефекты в подошве рельса могут быть выявлены магнитным методом, а какие — нет, является компьютерное моделирование процесса рассеяния магнитного потока на несплошности в ферромагнетике. Полученные характеристики поля рассеяния позволяют симитировать сигнал твердотельного датчика, используемого на практике [20].

Для предварительной оценки возможности обнаружения поперечных трещин в перьях подошвы рельса магнитным методом проведены исследования посредством трехмерного моделирования процесса рассеяния магнитного потока на моделях трещин в перьях подошвы. Для расчетов использовалось специализированное программное обеспечение, реализующее метод конечных элементов применительно к системе уравнений Максвелла относительно векторов индукции и напряженности магнитного поля. Поскольку скорость перемещения намагничивающей системы и датчиков относительно рельса при контроле предполагалась относительно небольшой (до 200 мм/с), зависимость от времени искомых величин не рассматривалась, т.е. речь шла о чисто магнитоэстатической задаче. Это существенно сокращает объем необходимых вычислений по сравнению со случаем, когда подобных допущений не делается [21], однако не

позволяет учесть ряд магнитодинамических эффектов, таких как влияние вихревых токов на распределение магнитного поля в объекте контроля и, следовательно, на сигналы датчиков. Последующие экспериментальные исследования показали допустимость таких упрощений, поскольку изменение скоростей в диапазоне до 200 мм/с приводило лишь к малозначимым низкочастотным флуктуациям сигналов, не затрагивающим амплитуду импульсов от дефектов относительно базового уровня магнитного поля.

Связь между векторами напряженности магнитного поля и магнитной индукции в модели зависела от рассматриваемой области пространства. Внутри рельса и внутри магнитопровода отношение модулей указанных векторов полагалось нелинейным, определяемым уровнем поля в каждой отдельно взятой точке. Зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности поля, выражающие нелинейный характер связи между модулями векторов индукции и напряженности, показаны на рис. 2. Для всей остальной области пространства, т.е. для воздуха вокруг рельса и магнитопровода, равно как и внутри несплошности, относительная магнитная проницаемость устанавливалась постоянной и равной единице.

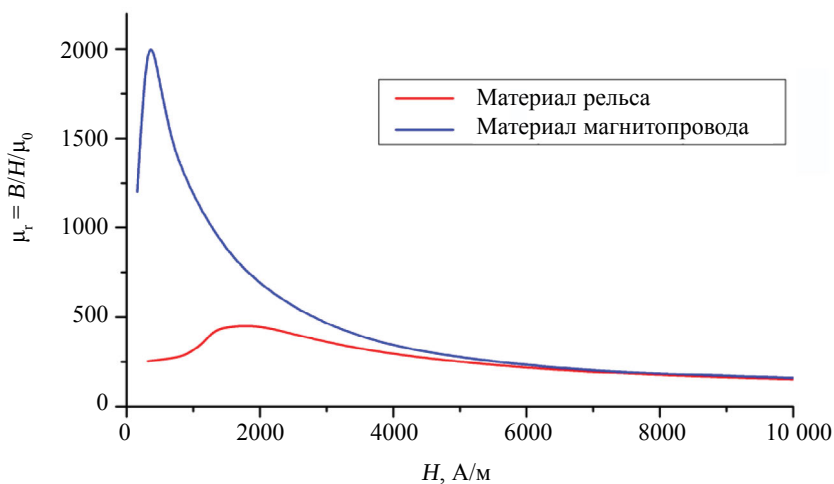


Рис. 2. Относительная магнитная проницаемость материалов магнитопровода и рельса в зависимости от напряженности магнитного поля, используемые при моделировании.

При реализации метода конечных элементов исследуемая область пространства покрывается неравномерной сеткой точек, в каждой из которых неизвестной является значение искомого вектора. В результате конечно-разностной аппроксимации операторов, входящих в решаемое дифференциальное уравнение, в каждом узле сетки между компонентами векторов в рассматриваемой точке и соседних с ней точках возникает линейное алгебраическое уравнение. В итоге задача сводится к решению системы алгебраических уравнений с весьма большим числом неизвестных одним из методов итераций. При решении такой системы алгебраических уравнений после каждой итерации сетка точек модифицируется — в нее добавляются узлы в тех областях пространства, где градиент полученного решения при переходе в соседние точки сильно изменяется. В нашем случае после нескольких итераций количество точек в сетке выросло приблизительно в 5 раз — с величины порядка 105 до полумиллиона.

На рис. 3 показана сетка точек на поверхности рельса, сформировавшаяся к концу итерационного процесса; особенно высокая концентрация узлов сетки наблюдается в месте контакта полюсов намагничивающей системы и подошвы рельса, поскольку именно в этих областях имеется значительное изменение направления векторов магнитной индукции, а их модули достаточно велики.

Намагничивающая система представляет собой П-образный электромагнит с адаптированной формой полюсных наконечников (рис. 4). Магнитодвижущая сила электромагнита взята равной 3500 Ампер-витков.

При этом уровень магнитной индукции в межполюсном пространстве может достигать уровня свыше 1,0 Тл (рис. 5), что вполне достаточно для обнаружения поперечных трещин.

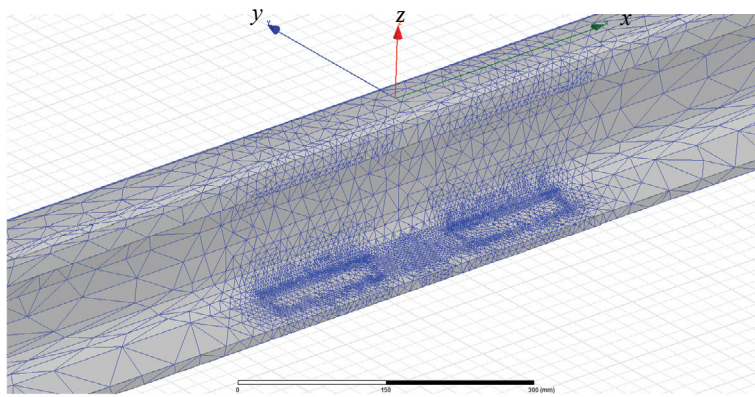


Рис. 3. Сетка точек на поверхности рельса при расчете методом конечных элементов.

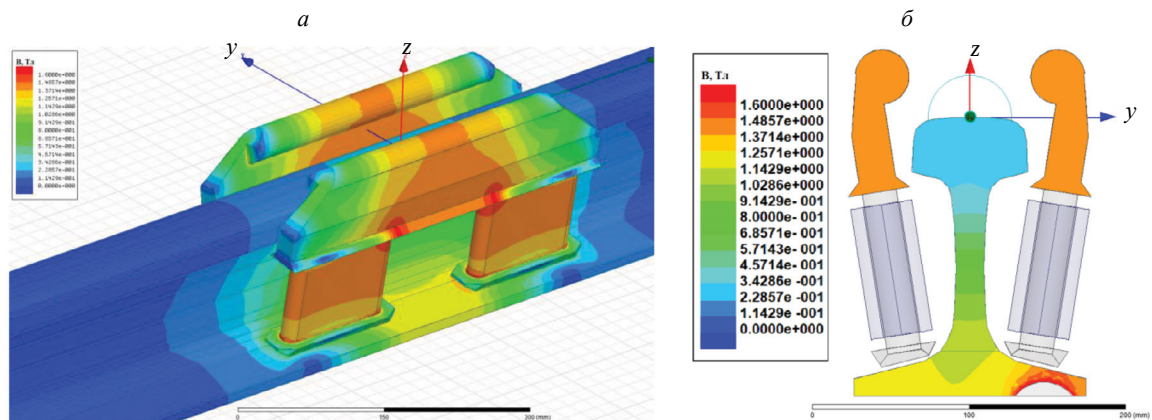


Рис. 4. Распределение магнитной индукции на поверхности рельса и на поверхностях двусторонней намагничивающей системы с сонаправленными магнитами (а); в поперечном сечении рельса и магнитопровода посередине между полюсами при наличии модели дефекта (б).

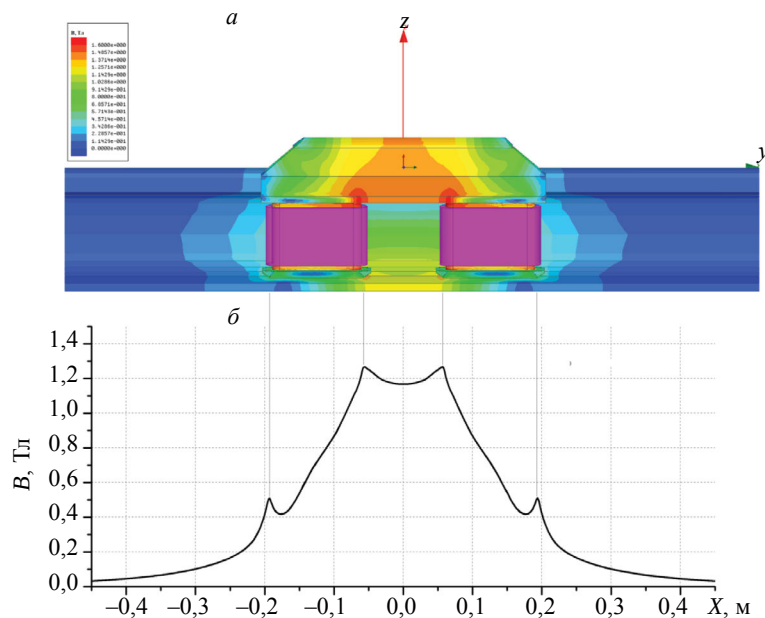


Рис. 5. Распределение магнитной индукции по продольной координате подошвы рельса (в 25 мм от края пера подошвы) при использовании двусторонней намагничивающей системы: П-образный электромагнит (а); график распределения магнитной индукции (б).

Как видно из рис. 5, наибольший уровень магнитной индукции 1,25 Тл приходится на подошву рельса под полюсами электромагнита, в то время как в середине межполюсного пространства уровень магнитной индукции составляет приблизительно 1,2 Тл.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ РАССЕИВАНИЯ В ЗОНЕ ДЕФЕКТА ПОДОШВЫ РЕЛЬСА

На основании анализа статистики изломов из-за дефектов в подошве рельса, в качестве типичного дефекта рассмотрена модель трещины глубиной 10 мм, длиной 35 мм, раскрытием 1 мм, развивающейся от нижней поверхности подошвы (рис. 6а). Также взята модель трещины, развивающейся от боковой грани подошвы рельса глубиной 10 мм и раскрытием 1 мм (рис. 6б).

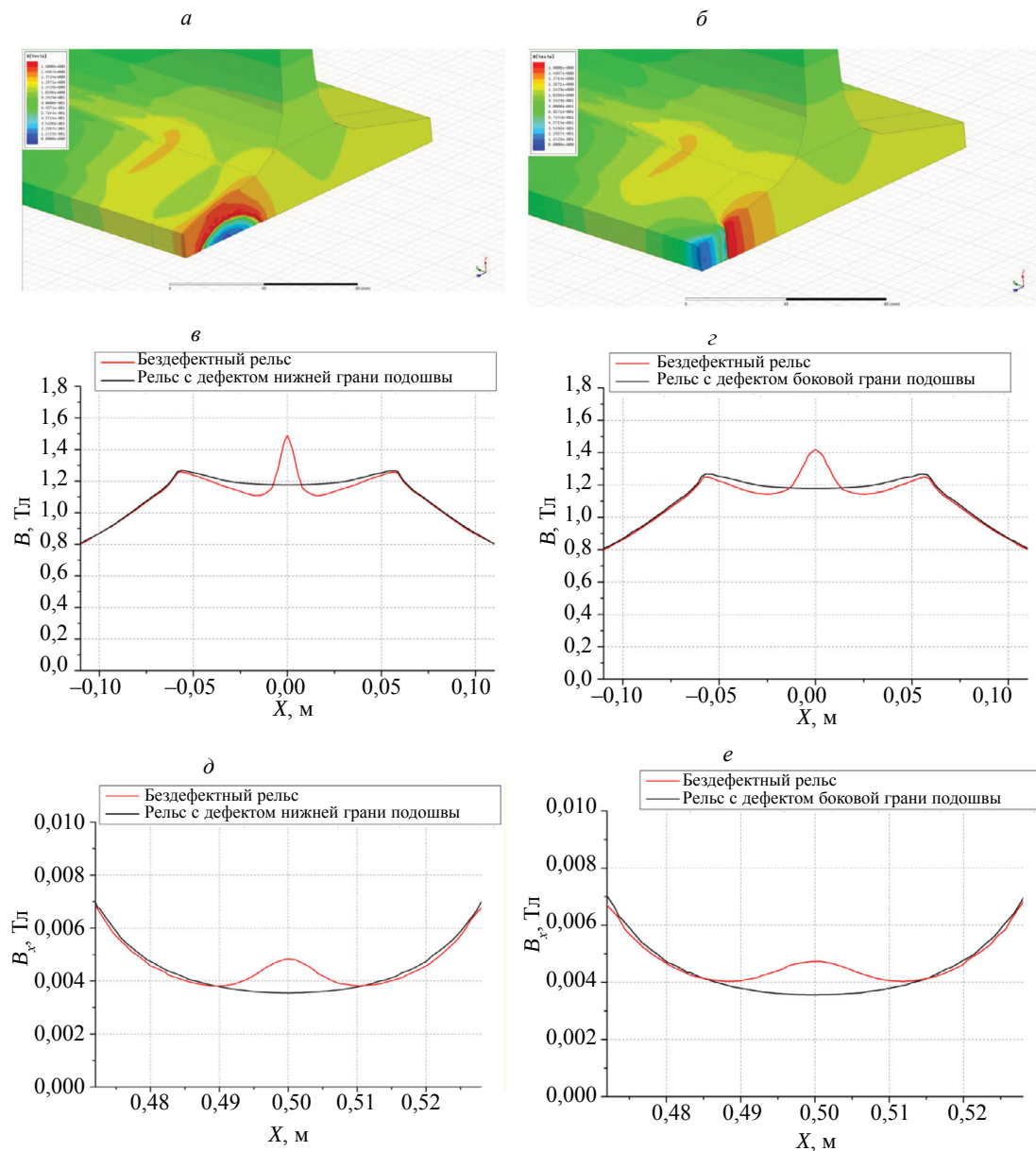


Рис. 6. Распределение магнитной индукции в окрестности дефектов подошвы рельса:

a, в, д — модель трещины расположена в центральной части пера подошвы; *б, г, е* — на краю пера подошвы; *a, б* — магнитная индукция на поверхности и в поперечном сечении рельса; *в, г* — распределения по продольной координате магнитной индукции на поверхности пера подошвы; *д, е* — распределения по продольной координате тангенциальной составляющей магнитной индукции в воздухе в 2,5 мм над поверхностью пера подошвы.

Моделирование продемонстрировало, что при наличии несплошностей происходит вытеснение магнитного потока, которое может быть зафиксировано в виде сигналов при измерении тангенциальной составляющей магнитного поля датчиками, расположенными над верхней гранью подошвы рельса (рис. 6д, е).

Значения величины магнитной индукции, представленные на графиках рис. 6в—е, получены на расстоянии 25 мм от боковой грани подошвы (соответствующая точка в поперечном сечении рельса показана на рис. 7).

Таким образом, установлено, что данные модели трещин могут регистрироваться в виде сигналов с амплитудой около 20 % относительно уровня поля в воздухе на бездефектном участке.

Подробная оценка выявляемости моделей дефектов в проекции шейки не проводилась, т.к. эта область эффективно контролируется ультразвуковыми средствами контроля.

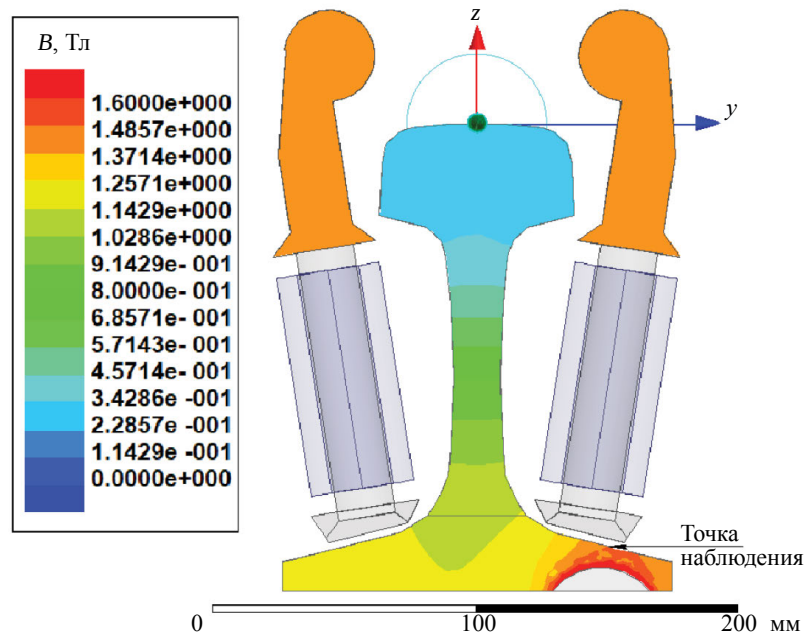


Рис. 7. Точка наблюдения (25 мм от боковой грани) за величиной магнитной индукции в процессе моделирования.

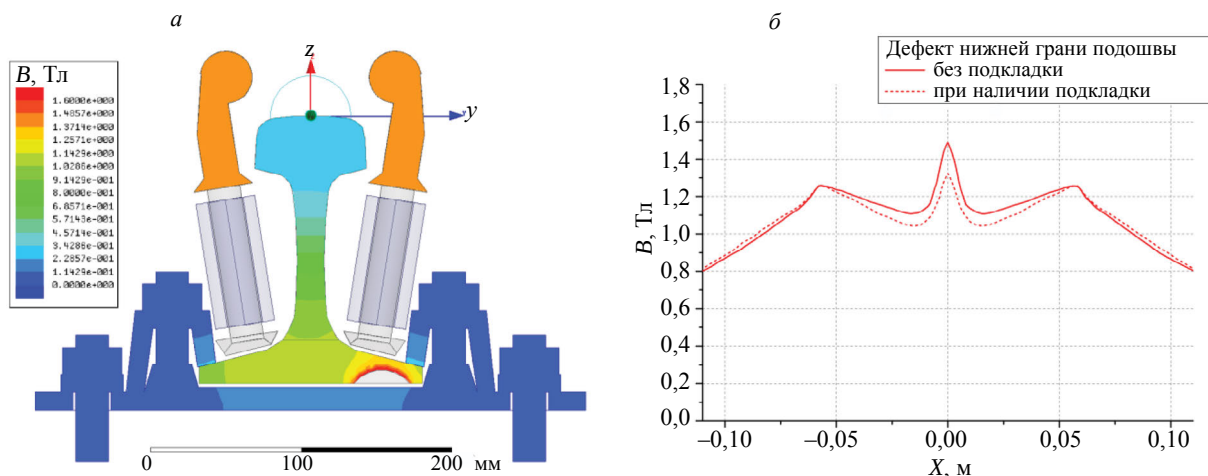


Рис. 8. Распределение магнитной индукции в поперечном сечении рельса, сердечников, рельсового крепления (а) и на верхней грани подошвы рельса по продольной координате, в 25 мм от боковой грани (б).

Отдельно оценена возможность обнаружения моделей дефектов в области рельсовых креплений (рис. 8), так как отклик от дефекта ослабляется ввиду массивной металлической конструкции рельсовых креплений.

Как видно из рис. 8б, магнитная индукция подошвы рельса уменьшается приблизительно на 13 % при наличии рельсового крепления, однако все еще превышает уровень свыше 1,0 Тл. Возможность выявления дефектов при наличии рельсовых креплений сохраняется.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТА

В процессе проработки вариантов будущей конструкции системы намагничивания, способной обеспечить требуемый уровень намагниченности и проходящей рельсовые крепления, промоделировано несколько вариантов П-образной системы намагничивания:

- опирающейся на перья подошвы с полюсами в виде плоских широких пластин и электромагнитами, расположенными выше головки рельса;
- с размещением катушек электромагнита в подголовочном пространстве;
- с двумя вертикальными электромагнитами, размещенными в пространстве между шейкой рельса и креплениями.

Последний вариант оказался наиболее удачным, именно этот вариант системы намагничивания с вертикальным размещением электромагнитов приведен на рис. 8а. Причем специальная форма электромагнитов спроектирована для возможности перевода намагничивающей системы в транспортное положение без соприкосновения с рельсом и креплениями.

Для возможности опробования макета в лабораторных условиях два электромагнита были объединены единой пластиной, полюса электромагнитов дополнены опорными роликами (подшипниками) для возможности перемещения вдоль рельса, а также подшипниками с опорой на шейку рельса (рис. 9).

Основные данные системы намагничивания:

- масса 36 кг;
- магнитодвижущая сила 8 000 Ампер-витков;
- сечение магнитопровода 25 см²;
- межполюсное расстояние 258 мм;
- ток в каждой из четырех катушек при питании от 12 В — 3А.

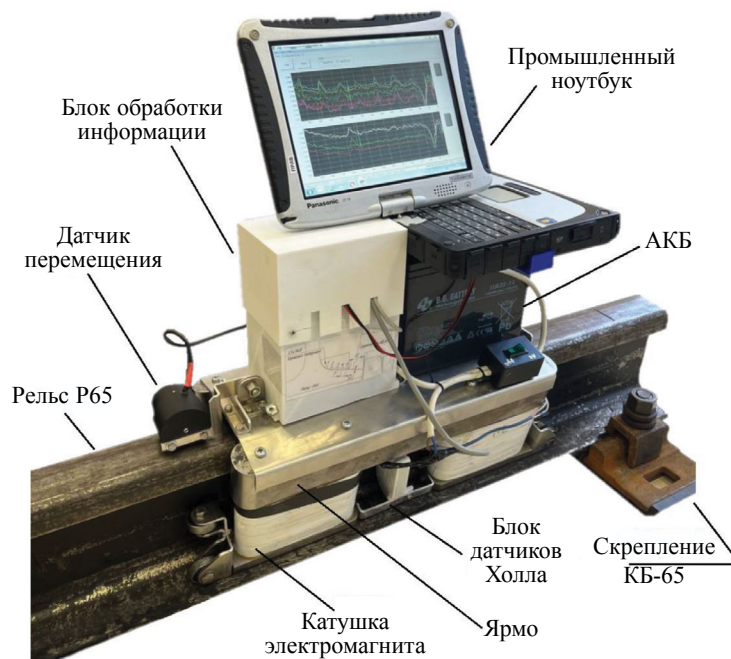


Рис. 9. Макет системы намагничивания и съема информации.



Рис. 10. Размещение датчиков Холла по поверхности перьев подошвы.

Разработаны электрические схемы и конструкция для системы съема информации, содержащей по пяти датчиков Холла (ДХ) на каждое перо, измеряющих тангенциальную составляющую индукции магнитного поля. Конструктивно на каждом пере между полюсами закреплен корпус, содержащий электронную плату с усилителями и ДХ (рис. 10).

Регистрация сигналов по всем десяти каналам производится с помощью внешнего АЦП (Е14-440), передающего оцифрованную информацию в компьютер по шине USB. Отображение данных осуществляется с помощью защищенного планшетного ноутбука Panasonic CF-19. Разработано специализированное программное обеспечение на базе библиотек от АЦП, предусматривающее цифровую низкочастотную фильтрацию сигналов от датчиков Холла.

Электропитание макета осуществляется от аккумуляторной батареи (АКБ).

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРОВ ПОЛЮСОВ МАГНИТОВ И ДАТЧИКОВ С РЕЛЬСОМ

С помощью макета получены экспериментальные зависимости амплитуд сигналов от моделей дефектов от величины зазора между полюсами и рельсом (рис. 11) и зазора между ДХ и рельсом (рис. 12).

Как видно из рис. 11, при увеличении зазора между полюсами электромагнитов и пером подошвы рельса на каждый 1 мм относительная амплитуда сигнала на ДХ снижается примерно на 10 %. Полученные данные качественно согласуются с [22]. Легенда на графике обозначает расстояние ДХ от края пера, например, график «ДХ-35» соответствует расположению датчика на расстоянии 35 мм от края пера.

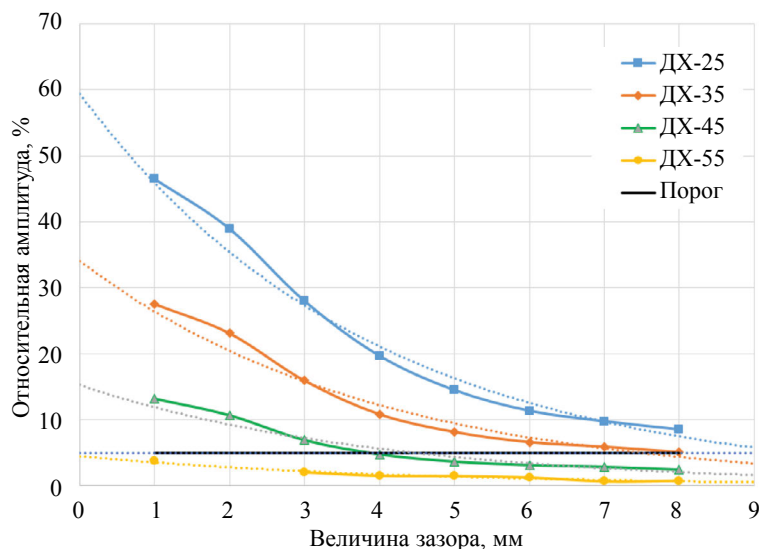


Рис. 11. Зависимость уровня относительной амплитуды сигнала от модели дефекта (высотой 9 мм в перо подошвы) при изменении величины зазора между полюсами электромагнита и пером подошвы.

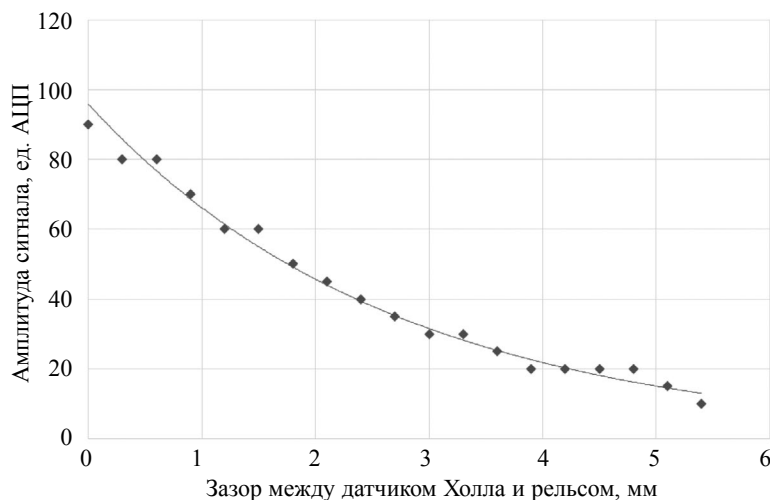


Рис. 12. График зависимости амплитуды сигнала датчика Холла от величины зазора между датчиком Холла и поверхностью пера подошвы.

Из рис. 12 следует, что при увеличении зазора между ДХ и рельсом на каждые 0,1 мм амплитуда сигнала падает на начальном отрезке (0—1 мм) примерно на 7 %.

На основании этих данных в макете установлены минимально допустимые для работы в лабораторных условиях зазоры 2,0 и 0,4 мм соответственно.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫЯВЛЯЕМОСТИ МОДЕЛЕЙ ТРЕЩИН

Для установления возможности выявления моделей трещин в отрезках рельсов и оценки минимальных выявляемых размеров изготовлены модели, расположенные в разных частях подошвы (перьях и центральной части) и имеющих различные геометрические размеры. Рассмотрим выявляемость моделей трещин в отрезке рельса, с шестью моделями трещин (рис. 13), цвет легенды соответствует позициям ДХ (см. рис. 10).

Выявляемость моделей трещин исследовалась как в зоне рельсовых скреплений (типа КБ-65), так и вне этой зоны.

Все изготовленные модели трещин выявлены вне зоны рельсовых скреплений. Как и ожидалось, наличие рельсовых скреплений (см. рис. 8) приводит к снижению уровня намагниченности металла рельса и, как следствие, к уменьшению амплитуды полезного сигнала от модели дефектов. Модели дефектов В—В (пропил глубиной всего 4 мм на краю пера), Г—Г (пропил в центральной части рельса в проекции шейки), Е—Е (вертикальное сверление — неплоскостной дефект) хоть и дают соответствующие отклики, однако амплитуда таких сигналов сопоставима с уровнем шумов.

Стоит отметить, что модель дефекта Г—Г также может быть уверенно обнаружена у.з. методом с поверхности катания рельса.

В целом, экспериментальные результаты подтвердили результаты компьютерного моделирования.

Доказано, что с помощью магнитного метода контроля возможно обнаружение моделей трещин в виде сегмента, развивающегося от нижней части пера глубиной от 4 мм вне зоны рельсовых скреплений и от 8 мм в зоне рельсовых скреплений, при любом их расположении в поперечном сечении рельса (в центральной части пера, на конце пера или в центральной части рельса, в проекции шейки или около нее).

Таким образом, проведенные компьютерное моделирование и экспериментальные исследования показывают потенциальную возможность обнаружения трещин в перьях подошвы магнитным методом и позволяют оценить выявляемые минимальные размеры трещин как в зоне скреплений, так и вне них.

В процессе выполнения работ промежуточные итоги неоднократно демонстрировались на специальном испытательном участке пути, где выявлены все плоскостные модели трещин, аналогичные моделям на рис. 13 с А—А по Д—Д.

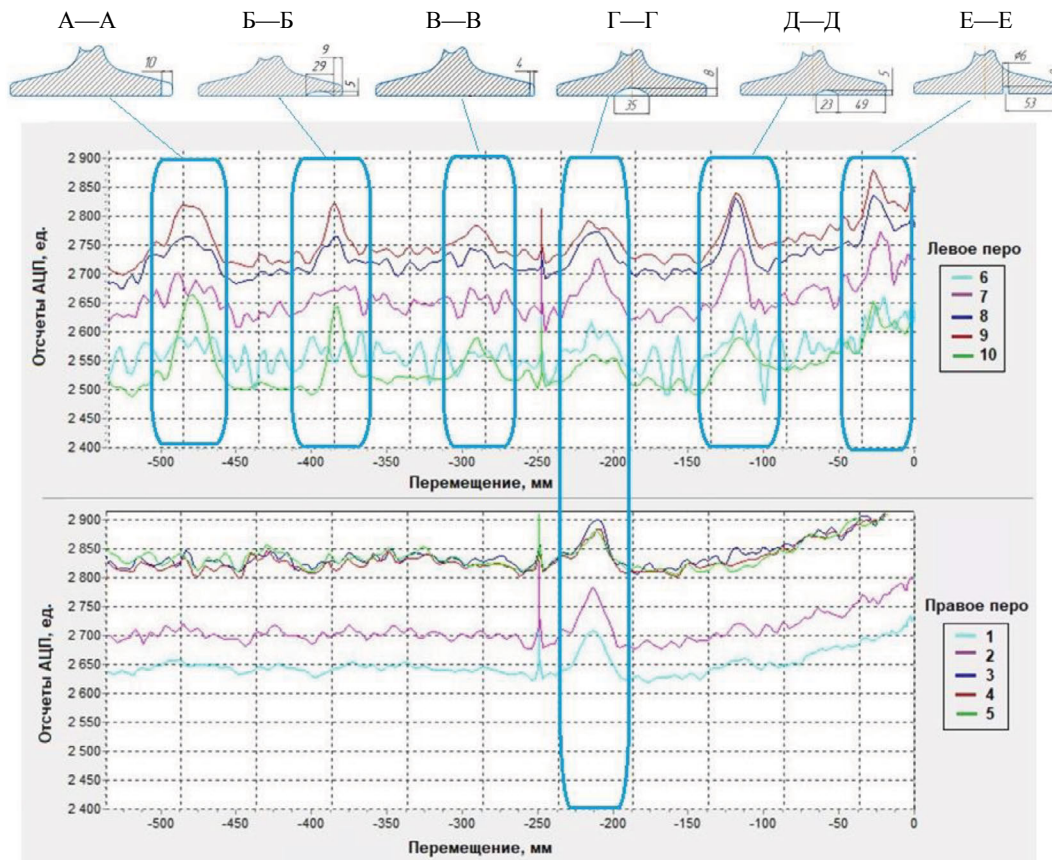


Рис. 13. Сигналы, полученные от моделей трещин при сканировании макетом: верхняя часть соответствует одному перу, нижняя — другому перу подошвы рельса (№ канала соответствует поз. ДХ на рис. 9).

Дополнительное повышение эффективности обнаружения дефектов в перьях подошвы можно выполнить путем сравнения отклонений уровней магнитного поля с правой и левой стороны рельса [23].

ВЫВОДЫ

1. Компьютерное моделирование подтверждает теоретическую возможность обнаружения поперечных трещин в перьях подошвы рельсов магнитным методом.

2. Установлено, что для обнаружения трещин в перьях подошвы рельсов приемлемый уровень магнитной индукции (свыше 1,0 Тл) достигается при использовании установленных на подошве двух П-образных электромагнитов, полюса которых сонаправлены.

3. Сигналы от моделей трещин в подошве рельса, имитирующие плоскостные поперечные трещины, регистрируются с амплитудой около 8 % относительно уровня намагниченности на бездефектном участке подошвы рельса.

4. Если модель трещины расположена в центральной части ферромагнитного скрепления по длине рельса, вероятность ее обнаружения значительно снижается, главным образом из-за металлической шпальной подкладки.

5. Исследованы зависимости влияния зазоров между полюсами электромагнита и рельсов, между датчиками Холла и рельсом на величину сигналов от моделей трещин. В качестве оптимальных для условий эксплуатации приняты зазоры $z = 2,0$ мм и $\delta = 0,4$ мм соответственно.

6. Минимальная глубина трещин, развивающихся от боковых граней подошвы рельса, которые способен обнаружить изготовленный макет: от 4 мм вне зон рельсовых скреплений и от 8 мм в зоне скреплений. Для трещин, развивающихся от нижней грани подошвы рельса, от 5 мм глубиной и 20 мм длиной, независимо от наличия скреплений, за исключением трещин, находящихся в проекции шейки рельса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шур Е.А., Борц А.И., Заграничек К.Л., Васильева С.А. Причины изломов рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 5. С. 9—14. EDN WXQQDS.
2. Шур Е.А. Повреждения рельсов. М.: Интекст, 2012. 192 с. ISBN: 978-5-89277-108-5.
3. Ильин В.А., Таргонский К.Г. Способ ультразвукового контроля подошвы железнодорожных рельсов / Патент на изобретение № 2085936 С1. Оpubл. 27.07.1997.
4. Мосягин В.В., Марков А.А. Исследование возможности контроля перьев подошвы железнодорожных рельсов / Сб. научн. трудов. В мире неразрушающего контроля и диагностики материалов промышленных изделий и окружающей среды. Материалы IV Всероссийского с международным участием научно-практического семинара. СПб.: СЗТУ, 2003. С. 129.
5. Никифорова О.Ж., Брандис М.П., Лончак В.А., Никифорова Ж.Г. Ультразвуковой контроль подошвы железнодорожных рельсов посредством ЭМА-преобразователей // УЗДМ 2009. XX Петербургская конференция. СПб.—Репино, 26—28 мая 2009. С. 59—60.
6. Тарабрин В.Ф., Ильин В.А., Татаринов В.О., Одынец С.А. Способ ультразвукового контроля подошвы рельса / Патент на изобретение № 2353924. Оpubл. 27.04.2009. Бюл. № 12.
7. Климов Я. Изучение без разрушения // Гудок. № 131 от 21 июля 2020. С. 5.
URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1528362>
8. Марков А.А., Олейник В.Е., Разорвин В.Е., Ликсаков С.В. Устройство для ультразвуковой дефектоскопии рельсов / Патент на полезную модель № 89235. Оpubл. 27.11.2009.
9. Базулин Е.Г., Тарабрин В.Ф. Выбор метода ультразвукового контроля перьев подошвы рельса // Контроль. Диагностика. 2017. № 9. С. 20—31.
10. Марков А.А., Молотков С.Л. Способ ультразвукового контроля подошвы рельсов / Патент на изобретение № 2645818. С1. Оpubл. 28.02.2018. Бюл. № 7.
11. Сясько В.А. Об использовании технологии MFL для выявления коррозионных повреждений обшивки судов // В мире НК. 2015. Т. 18. № 3. С. 7—10. EDN UDJSMR.
12. Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П., Шаранова Д.А. Анализ погрешности измерений остаточной толщины днищ цилиндрических вертикальных резервуаров по технологии MFL с использованием метода конечных элементов // Контроль. Диагностика. 2016. № 11. С. 10—15. EDN XAAJBV. DOI: 10.14489/td.2016.11.pp.010-015
13. Марков А.А., Политай П.Г., Маховиков С.П., Алексеев Д.В., Кузнецова Е.А. Комплексный анализ состояния пути с помощью нового вагона-дефектоскопа АВИКОН-03 // В мире НК. 2013. № 3 (61). С. 74—79.
14. Шлеенков А.С., Булычев О.А., Пастухов А.Б., Шлеенков С.А. О возможности применения магнитной дефектоскопии рельсов в процессе их производства // Дефектоскопия. 2019. № 12. С. 49—55. EDN HZNDEJ. DOI: 10.1134/S0130308219120066
15. Антипов А.Г., Марков А.А. Выявляемость дефектов в рельсах магнитным методом // Дефектоскопия. 2019. № 4. С. 21—29.
16. Антипов А.Г., Марков А.А. Оценка глубины выявления поперечных трещин магнитодинамическим методом в дефектоскопии рельсов // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 57—68. EDN SYRLMR. [Antipov A.G., Markov A.A. Evaluation of transverse cracks detection depth in MFL rail NDT // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 8. P. 481—490. DOI 10.1134/S1061830914080026. EDN UFHPIJ.]
17. ГОСТ Р 51685—2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 95 с.
18. DIN EN 13674-1—2017. Railway applications — Track-Rail — Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above.
19. Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П. Оптимизация параметров первичных измерительных преобразователей, реализующих технологию MFL // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 64—71. EDN VLQFUV.
20. Jia Y., Liang K., Wang P., Ji K., Xu P. Enhancement method of magnetic flux leakage signals for rail track surface defect detection. // IET Sci. Meas. Technol. V. 14. P. 711—717. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5651>
21. Antipov A.G., Markov A.A. Using a Tail Field in High-Speed Magnetic Flux Leakage Testing // Journal of Nondestructive Evaluation. 2022. V. 41. Art. no. 2.
22. Муравьев В.В., Стрижак В.А., Балобанов Е.Н. К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1(17). С. 197—205. EDN MNQMXH.
23. Марков А.А., Антипов А.Г., Мосягин В.В. Способ магнитной дефектоскопии подошвы рельсов. Патент № 2736177 С1 Российская Федерация, МПК G01N 27/82. № 2020119190. Заявл. 02.06.2020. Оpubл. 12.11.2020. Заявитель ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "РАДИОАВИОНИКА". EDN JSVPTF.

REFERENCES

1. *Shur E.A.* et al. Evolution of the Contact-Fatigue Defects Caused Rail Failure Rate // Russian Railway Science Journal. 2015. V. 3. P. 3—9.
2. *Shur E.A.* Rail damage. Moscow: Intext, 2012. 192 p. ISBN: 978-5-89277-108-5
3. *Ilyin V.A., Targonsky K.G.* Method for ultrasonic check of rail base / Patent for invention No. 2085936 C1. Published on 07/27/1997.
4. *Mosyagin V.V., Markov A.A.* Investigation of the possibility of controlling the feathers of the base of railway rails. Collection of scientific works. In the world of non-destructive testing and diagnostics of materials of industrial products and the environment // Materials of the IV All-Russian scientific and practical seminar with international participation. St. Petersburg: NWTU, 2003. P. 129.
5. *Nikiforenko O.J., Brandes M.P., Lonchak V.A., Nikiforenko J.G.* Ultrasonic inspection of the base of railway rails by means of EMA converters // UZDM 2009. XX St. Petersburg Conference. St. Petersburg — Repino, May 26—28, 2009. P. 59—60.
6. *Tarabrin V.F., Ilyin V.A., Tatarinov V.O., Odynets S.A.* Method of ultrasonic inspection of the base of the rail / Patent for invention No. 2353924. Published on 04/27/2009. Byul. No. 12.
7. *Klimov Ya.* Studying without destruction // Gudok. 2020. No. 131. dated July 21. P. 5. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1528362>
8. *Markov A.A., Oleinik V.E., Razorvin V.E., Aksakov S.V.* Device for ultrasonic flaw detection of rails / Utility model patent No. 89235. Published on 11/27/2009.
9. *Bazulin E.G., Tarabrin V.F.* The choice of the method of ultrasonic inspection of the feathers of the base of the rail // Control. Diagnostics. 2017. No. 9. P. 20—31.
10. *Markov A.A., Molotkov S.L.* Method of ultrasonic inspection of the sole of rails. (2018).
11. *Syasko V.A.* On the use of MFL technology to detect corrosion damage to ship skin // In the world of non-destructive testing. 2015. V. 18. No. 3. P. 7—10.
12. *Potapov A.I.* et al. Analysis of the measurement error of the residual thickness of the bottoms of cylindrical vertical tanks using MFL technology using the finite element method // Control. Diagnostics. 2016. No. 11. P. 10—15. DOI: 10.14489/td.2016.11.pp.010-015
13. *Markov A.A.* et al. Comprehensive analysis of the condition of the track using the new AVICON-03M flaw detector car // In the World of non-destructive testing. 2013. No. 3. P. 74—79.
14. *Shleenkov A.S.* et al. On the possibility of using magnetic flaw detection of rails in the process of their production // Defektoskopiya. 2019. No. 12. P. 49—55.
15. *Antipov A.G., Markov A.A.* Detection of defects in rails by the magnetic method // Defektoskopiya. 2019. No. 4. P. 21—29.
16. *Antipov A.G., Markov A.A.* Evaluation of transverse cracks detection depth in MFL rail NDT // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 8. P. 481—490.
17. GOST R 51685-2013. Railway rails. General technical specifications, 2014. P. 12—13.
18. DIN EN 13674-1-2017. Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above.
19. *Potapov A.I., Syasko V.A., Pudovkin O.P.* Optimization of parameters of primary measuring transducers implementing MFL technology // Defektoskopiya. 2015. No. 8. P. 64—71.
20. *Jia Y., Liang K., Wang P., Ji K., Xu P.* Enhancement method of magnetic flux leakage signals for rail track surface defect detection. // IET Sci. Meas. Technol. V. 14. P. 711—717. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5651>
21. *Antipov A.G., Markov A.A.* Using a tail field in high-speed magnetic flux leakage testing // Journal of Nondestructive Evaluation. 2022. No. 41. P. 1—9.
22. *Muravyev V.V., Strizhak V.A., Balabanov E.N.* To calculate the parameters of the magnetization system of an electromagnetic-acoustic transducer // Intelligent systems in Production. 2011. No. 1. P. 197—205.
23. *Markov A.A., Antipov A.G., Mosyagin V.V.* Metod of rail base magnetic flaw detection / Patent for invention No. 2736177 C1. Published on 12/11/2020.