

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ

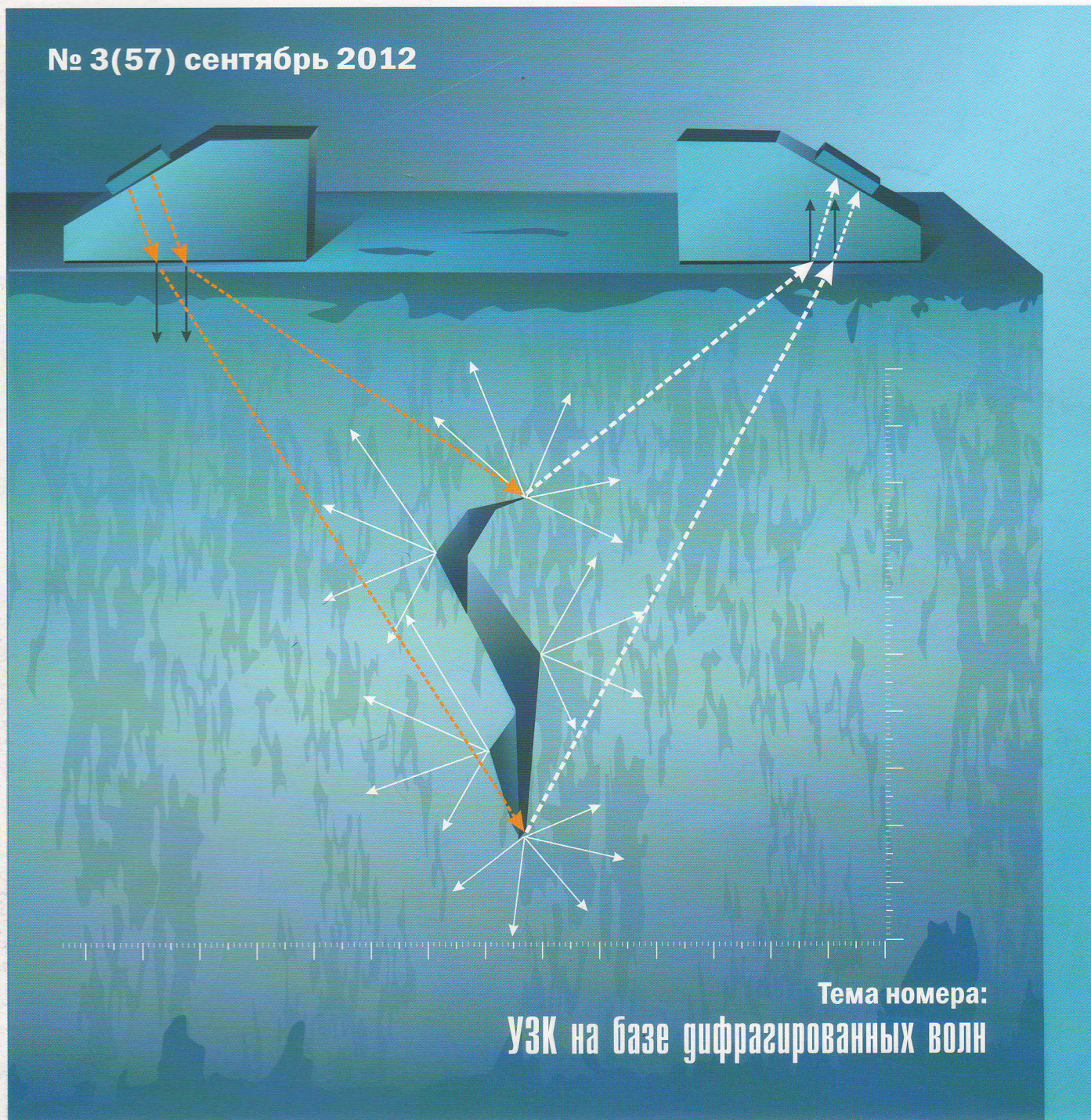
ISSN 1609-3178

# В МИРЕ НК

*Марков  
Англиков*

В МИРЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

№ 3(57) сентябрь 2012



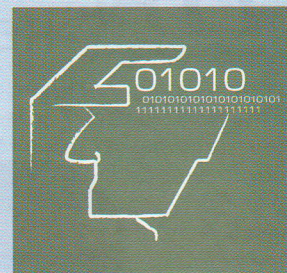
Тема номера:  
УЗК на базе дифрагированных волн



## Magnetodynamic Method for Rails Inspection

A. A. Markov,  
A. G. Antipov

The magnetodynamic method for defect detection in rails, its history of development and functional capabilities are considered. It is shown that modernization of rail magnetization system enables to increase stability of method characteristics as well as defect detectability under severe conditions of testing (low temperatures, high speeds). High-repeatability of testing signals creates opportunities for automation of testing signals decoding.



# МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ РЕЛЬСОВ

**З**начительная часть эксплуатирующихся в России железнодорожных путей находится в зонах с суровыми климатическими условиями. Это обуславливает необходимость осуществлять диагностику состояния рельсового пути (и в первую очередь, рельсов) в сложных условиях: при значительном уровне снежного покрова и при экстремально низких температурах. Однако широко распространенные ультразвуковые средства рельсовой дефектоскопии не вполне подходят для решения этой задачи. Действительно, при отрицательных температурах поддерживать приемлемый уровень акустического контакта становится весьма затруднительно, что негативно сказывается на качестве получаемой дефектоскопической информации и производительности комплекса в целом.

При температуре ниже  $-30^{\circ}\text{C}$  эксплуатация ультразвуковых средств дефектоскопии, особенно автомотрис и вагонов-

дефектоскопов, движущихся со скоростью до  $60\text{ км/ч}$ , становится практически невозможной. Выходом из сложившейся ситуации может служить использование иных принципов обнаружения опасных дефектов в рельсах, не требующих обеспечения акустического контакта между датчиком системы и контролируемым рельсом. Одним из таких принципов, позволяющим обнаруживать дефекты в головке рельса до достижения ими критических размеров является магнитодинамический метод [1].

Магнитные методы в отечественной дефектоскопии рельсов имеют давнюю историю. Первые опытные образцы дефектоскопов, основанные на магнитных принципах, появились еще в 1930-х гг. Это весьма оригинальные вело-дефектоскопы с регистрацией сигналов контроля и автодрезины Ф.М. Карпова [2]. К сожалению, тогда эксперименты с автодрезинами-дефектоскопами окончилось неудачно, так как при скоростях более  $5\text{ км/ч}$  недопустимо высокий уровень шума делал контроль рельсов неэффективным.

С 1953 – 66 гг. на железных дорогах МПС СССР начали успешно эксплуатироваться новые конструкции магнитных вагонов-дефектоскопов разработки ВНИИЖТ и УралФТИ.

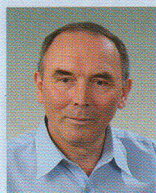
Магнитные вагоны-дефектоскопы (МВД) обеспечивают контроль рельсов при скоростях до  $70\text{ км/ч}$  и обнаруживают поперечные трещины (дефекты кода 20 и 21 по [3]) с площадью поражения головки рельса от 25% и глубиной залегания дефекта до  $4\text{ мм}$  [1]. Кроме того, уверенно выявляются поперечные и продольные трещины кода 24, 25, 27, 30В и 30Г, а также изломы рельсов (коды 70, 74 и 79 по [3]).

Намагничивающая система подвешивается на установленной в середине вагона специальной (третьей) индукторной тележке. Система состоит из двух мощных «П»-образных электромагнитов (по одному на каждую нитку пути) и создает в контролируемом участке рельса магнитный поток, необходимый для обнаружения дефектов. При магнитодвижущей силе катушек каждого электромагнита около  $40\text{ кА}\cdot\text{В}$  и номинальной величине зазора  $Z$  между полюсами и рельсом ( $8-12\text{ мм}$ ) в рельсе обеспечивается магнитный поток от  $7$  до  $10\text{ мВб}$ . Кроме намагничивания головки рельса значительная часть потока замыкается через вагонные конструкции и по воздуху, образуя поток рассеяния. Индукционная катушка, скользящая по поверхности катания, осуществляет фиксацию изменения магнитного потока над поверхностной или подповерхностной трещиной.

Дефектоскопные средства, основанные на магнитных («магнитодинамических») методах контроля, обладают рядом положительных качеств:

- могут работать во всех климатических зонах при любых погодных условиях;
  - результаты контроля не зависят от загрязненности поверхности катания рельсов;
  - позволяют однозначно соотносить результаты контроля к реальному пути за счет фиксации полей рассеяния многих конструктивных элементов рельсового пути (скреплений, элементов стрелочных переводов, стыков и др);
  - имеют большую производительность контроля ( $3000-4000\text{ км/месяц}$ );
  - просты и надежны в эксплуатации.
- Внедрение компьютерной регистрации сигналов магнитного контроля [4]

Сотрудники научно-технического комплекса систем неразрушающего контроля (НТК СНК) ОАО «Радиоавионика» (Санкт-Петербург):



**Марков  
Анатолий Аркадьевич**

Директор НТК СНК, д. т. н.



**Антипов  
Андрей Геннадиевич**

Ведущий инженер НТК СНК, к. ф.-м. н.



позволило повысить разрешающую способность системы и обнаруживать дефекты в пределах сварных и болтовых стыковых соединений рельсов (дефекты 26.3 и 21.1), ранее не выявляемых магнитными вагонами-дефектоскопами (МВД) с регистрацией сигналов на киноплёнку или бумажную ленту.

Долгие годы МВД позволяли успешно решать задачи обеспечения безопасности движения поездов, буквально «вытаскивая» опасные дефекты в рельсах до достижения ими критических размеров в самых неблагоприятных погодных условиях (метель, сильные морозы), когда все другие методы контроля становились малоэффективными [5]. На сети дорог МПС СССР в 1970 – 80-е гг. одновременно эксплуатировалось около сотни магнитных вагонов-дефектоскопов.

Опыт использования МВД выявил и их недостатки. Одним из конструктивных недостатков намагничивающей системы МВД было наличие воздушного зазора между полюсами магнита и рельсом. Требования безопасной эксплуатации комплекса заставляли делать этот зазор весьма большим (вместо требуемых  $Z = 8 \text{ мм}$  до  $23 \text{ мм}$ !), что приводило к значительному ослаблению магнитного потока в рельсе. В результате на дефектограмме за счет поля рассеяния весьма четко фиксировались конструктивные элементы пути (создавая видимость нормального функционирования комплекса), но отсутствовали сигналы от внутренних дефектов рельсов, доступных магнитодинамическому методу.

Вторым недостатком «П»-образной намагничивающей системы МВД являлось то, что межполюсное расстояние по составляло всего  $80 \text{ см}$ , что давало вы-

сокий уровень промагничивания рельса в статическом состоянии. Однако при движении на больших эксплуатационных скоростях ( $70 - 80 \text{ км/ч}$ ) за время прохождения намагничивающей системы над дефектным участком рельса магнитное поле не успевало проникать на достаточную глубину. Причина этого явления кроется в возрастании вихревых токов, препятствующих с увеличением скорости проникновению магнитного поля вглубь металла.

И, наконец, третий недостаток «П»-образной системы намагничивания — значительные габариты электромагнитов, полностью занимающих межколесное пространство индукторной тележки, и препятствующие размещению датчиков других систем. В результате многолетняя мечта многих дефектоскопистов — создание комплексного вагона-дефектоскопа, одновременно реализующего магнитные и ультразвуковые методы контроля рельсов, оставалась невыполнимой.

Для устранения этих недостатков в начале 1990-х гг. были предложены два направления дальнейшего развития средств рельсовой дефектоскопии. Во-первых, было принято решение о постепенной замене устаревающих МВД совмещенными вагонами-дефектоскопами (СВД), в которых должны были быть реализованы как магнитные, так и ультразвуковые методы контроля. Данное решение находится вполне в русле современных тенденций НК, свидетельствующих о том, что идеальных — универсальных, одинаково хорошо работающих при любых условиях, — средств дефектоскопии не существует, и для получения как можно более точной картины состояния объекта нужно использо-

вать комплексные устройства, основанные на разных физических принципах.

Во-вторых, была поставлена задача внести такие изменения в конструкцию намагничивающей системы, чтобы обеспечить глубокое промагничивание рельса на скоростях контроля вплоть до  $80 \text{ км/ч}$  и, в перспективе, — до  $120 \text{ км/ч}$ . Это позволило бы выявлять дефекты, залегающие глубоко под поверхностью головки рельса, в сочетании с высокой скоростью движения вагона.

В середине 1990-х гг. специалистами ВНИИЖТ (В.Л. Байдаков) и ОАО «Радиоавионика» в рамках работ по созданию СВД с дефектоскопическим комплексом «АВИКОН-03» была разработана и успешно внедрена новая магнитная подсистема. По сравнению со старыми МВД намагничивающая система подверглась кардинальным изменениям. Межполюсное расстояние увеличено более чем в 3 раза: это позволило решить проблему недостаточной глубины промагничивания рельса на высоких скоростях. Расчеты показывают, что даже на скоростях  $60 - 80 \text{ км/ч}$  распределение поля вблизи заднего полюса — там, где обычно устанавливают магнитные датчики, — остается практически однородным по сечению головки.

Вместе с тем, столь существенное увеличение межполюсного расстояния не привело к снижению величины магнитного потока в рельсе. Это было достигнуто за счет применения более эффективного способа инжекции магнитного поля. У вагонов-дефектоскопов, использующих «П»-образную систему намагничивания, магнитный поток, генерируемый катушками, заходил в рельс через воздушный зазор; магнитное со-

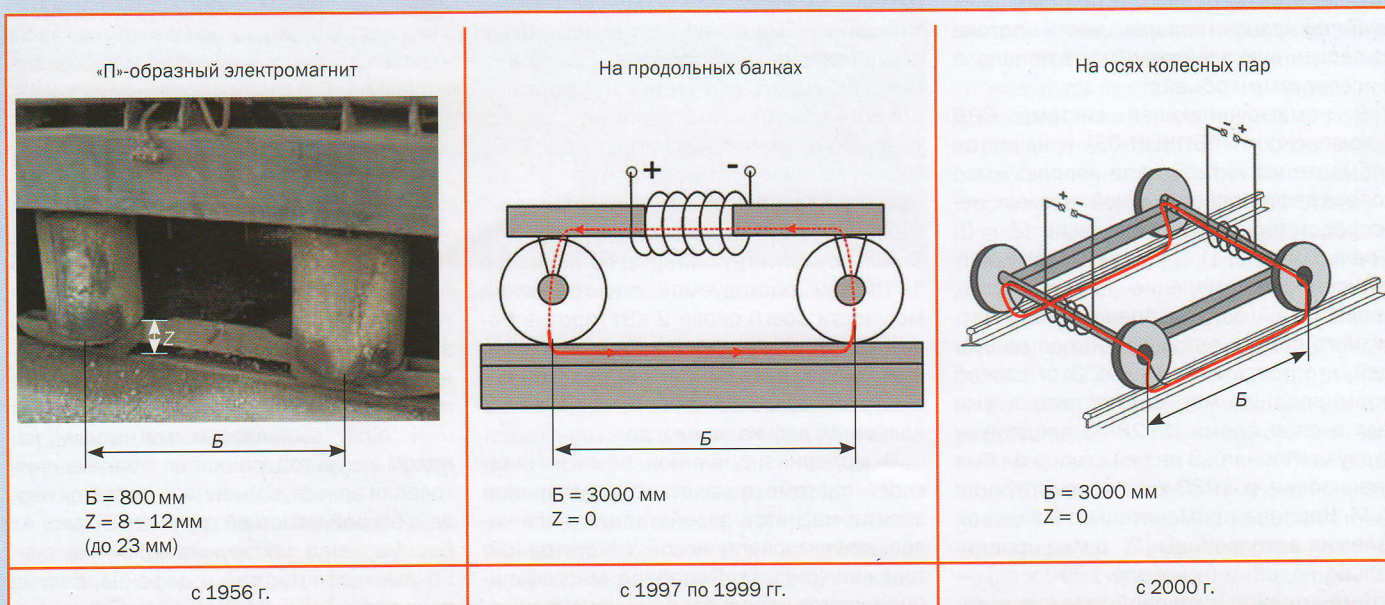


Рис. 1. Варианты систем намагничивания вагонов-дефектоскопов



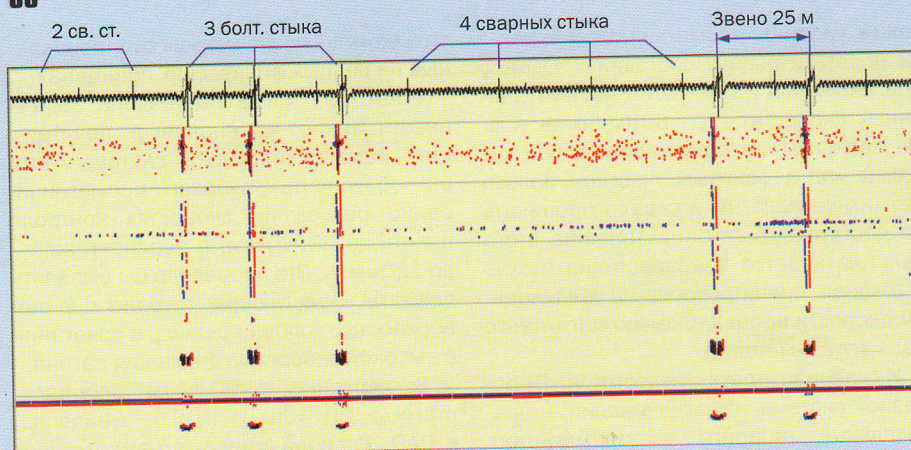


Рис. 2. Фрагмент дефектограммы вагона-дефектоскопа одной нитки рельсового пути (масштаб: 300 м/экран): верхняя линия — сигналы магнитного канала; нижние (5 зон регистрации) — сигналы ультразвуковых каналов

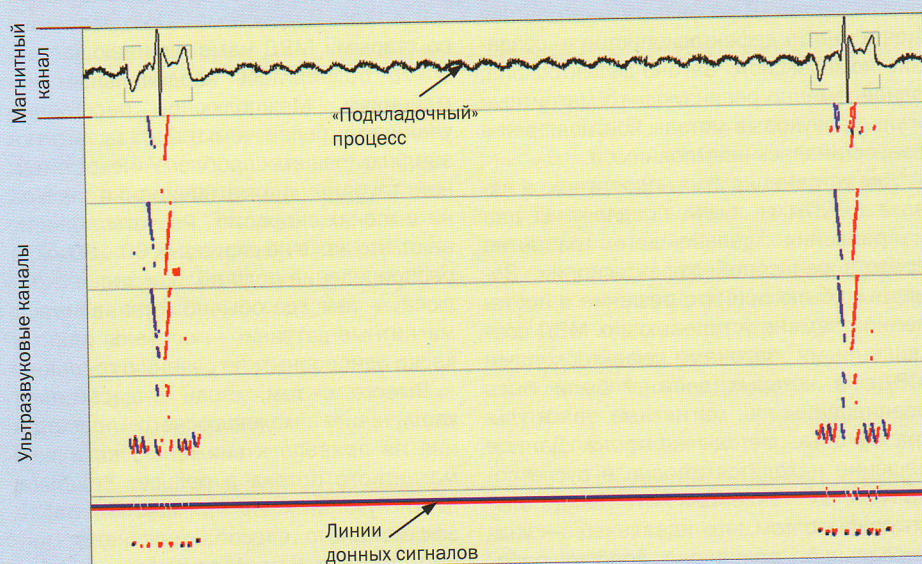


Рис. 3. Дефектограмма одного рельсового звена (магнитный и ультразвуковые каналы комплекса «АВИКОН-03» вагона-дефектоскопа)

противление данного элемента магнитной цепи было велико, и поэтому лишь крайне незначительная часть потока из сердечника электромагнита попадала в исследуемый объект.

В намагничивающей системе СВД с комплексом «АВИКОН-03» в качестве элемента магнитной цепи используются колеса дефектоскопической тележки, непосредственно контактирующие ( $Z = 0$ ) с рельсом (рис. 1). Благодаря этому магнитное сопротивление уменьшилось, произошло перераспределение магнитного потока в пользу той составляющей, что поступает в рельс. Этот способ формирования магнитного потока уже был в свое время (1928 г.) предложен Судзуки (Япония). В нашей стране он был реализован в 1930-х гг. в конструкции Ф. М. Карпова применительно к ходовой тележке автодрезины [2], а уже сравнительно недавно (в начале 1990-х гг.) — применительно к ходовой тележке вагона (конструкция Ч. А. Мусаева).

В отличие от этих конструкций в комплексе «АВИКОН-03» впервые проектирование магнитной системы было осуществлено на основе расчетных методов, таких как метод конформных преобразований, метод интегральных уравнений, теория магнитных цепей [6]. Это позволило оптимизировать основные конструктивно-технические характеристики магнитной системы: получить в рельсе магнитную индукцию не менее 1 Тл при расходуемой электрической мощности всего около 2 кВт (против более 15 кВт в конструкции Карпова) и минимизировать такие параметры, как диаметр оси колесной пары, толщина диска колеса, м. д. с. катушек и др.

В модернизированной намагничивающей системе в качестве сердечников электромагнитов задействованы оси колес дефектоскопической (индукторной) тележки (рис. 1). Подобное multifunctional использование конструктивных элементов позволило не только сни-

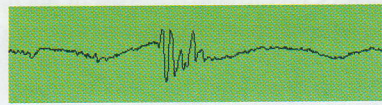
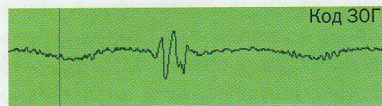
зить массу тележки за счет отказа от дополнительных сердечников, но и решило проблему длины магнитопроводов, актуальную для намагничивающей системы с большим межполюсным расстоянием. Технические решения, использованные при создании магнитной подсистемы СВД с комплексом «АВИКОН-03», доказали свою эффективность в ходе более чем десятилетней эксплуатации дефектоскопов на железных дорогах. В настоящее время на Горьковской, Октябрьской, Северо-Кавказской, Южно-Уральской ж. д. и в Казахстане работают 14 вагонов этого типа.

Помимо сигналов от дефектов в процессе контроля в магнитном канале присутствуют классифицируемые отклики от регулярных объектов рельсового пути — болтовых стыков (типовых и изолирующих), сварных стыков, в т. ч. алюминотермитных. А также сигналы от шпальных креплений, контррельсов, крестовин и рамных рельсов стрелок, переездов, противоугонов, километровых отметок и прочих объектов рельсового пути, характеризующихся присутствием крупных ферромагнитных элементов в непосредственной близости от рабочего рельса. В результате формируется своеобразная магнитно-ультразвуковая топограмма рельсовой нитки, по которой можно анализировать взаимное местоположение рельсовых звеньев и плетей по длине пути (рис. 2).

На рис. 3 в более крупном, чем на рис. 2, масштабе представлен фрагмент дефектограммы СВД с комплексом «АВИКОН-03» одного бездефектного рельсового звена (справа и слева — сигналы от болтовых стыков). На верхней дорожке отображаются сигналы магнитодинамического канала. При прохождении магнитного датчика над шпалами из-за наличия металлических шпальных подкладок и рельсовых скреплений магнитный поток рассеивания реагирует на периодическое изменение площади сечения намагничиваемого металла, вследствие чего формируется волнообразная линия, называемая на практике «подкладочным» процессом. На пяти дорожках ультразвуковых каналов в зоне основного металла рельсового звена отсутствуют какие-либо сигналы за исключением непрерывных линий донных сигналов (на практике возможны шумовые отражения).

К числу выявляемых магнитным каналом дефектов относятся повреждения головки рельса, а именно — дефекты первой, второй и третьей групп по [3] (рис. 4). Весьма четко обнаруживаются как одиночные дефекты, так и дефекты, взятые в накладки (кода 21.2Н и в зоне алюминотермитной сварки — 26.4). Характерные





Поверхностные повреждения кодов 10, 14, 17

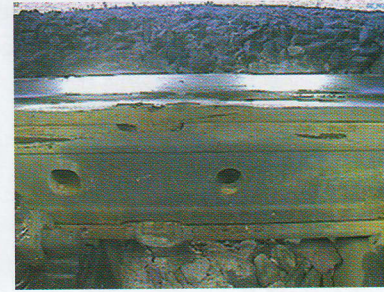
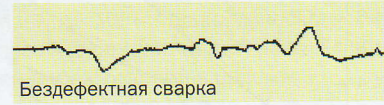
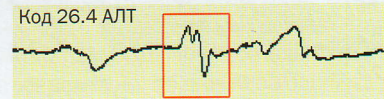
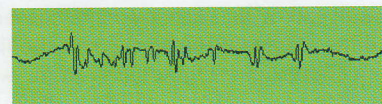


Рис. 4. Характерные сигналы магнитодинамического метода от внутренних и поверхностных дефектов головки рельсов

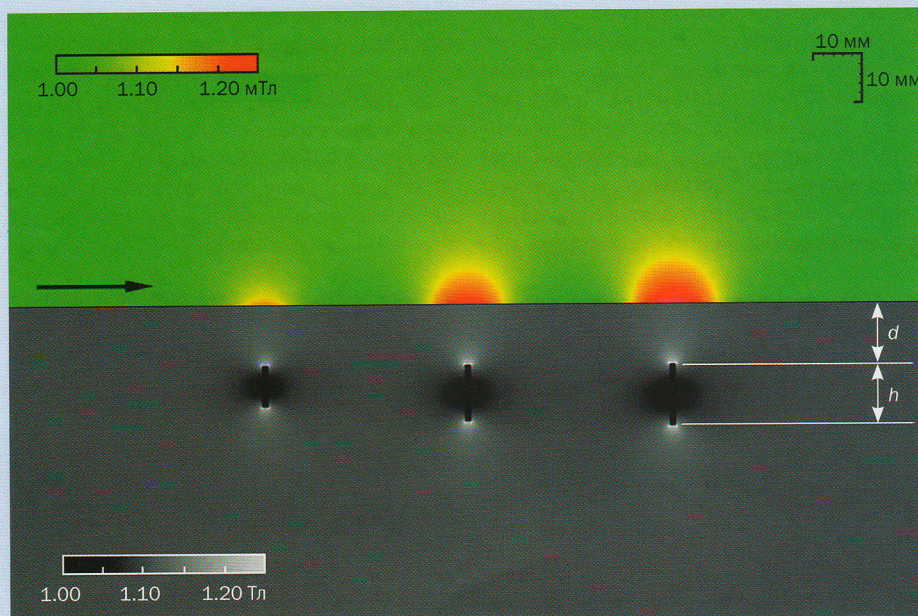


Рис. 5. Реакция магнитного поля на двумерные модели поперечных трещин (при  $d = 12$  и  $h = 8, 10$  и  $12$  мм)

импульсы значительной амплитуды формируются от поперечных трещин в головке рельса (коды 21.1–2 и 20), причем по величине амплитуды весьма часто можно судить о размере дефекта.

Таким образом, при использовании намагничивающих систем с достаточной величиной межполюсного расстояния отсутствует ограничение, связанное с малой глубиной промагничивания рельса на вы-

соких скоростях. Поэтому будет дефект обнаружен или нет зависит только от того, насколько импульс магнитного поля в воздухе над головкой рельса, порожденный возмущением магнитного потока в зоне дефекта, будет заметен на фоне различных шумов естественного и искусственного происхождения, наблюдаемых на магнитном канале. Исследования показывают, что амплитуда импульса определяется

размерами дефекта и его расстоянием от датчика, т. е. фактически глубиной залегания под поверхностью катания.

Для того чтобы получить количественные оценки к приведенным соображениям, рассмотрим двумерные модели поперечных трещин в головке рельса (рис. 5). Толщина зазора составляет 1 мм, а поле измеряется в воздухе в 4 мм над поверхностью ферромагнитного материала. Тогда тангенциальная составляющая магнитного поля как функция продольной координаты имеет положительный импульс с максимумом непосредственно над зазором. Появление положительного импульса связано с формированием дополнительного магнитного потока в воздухе, обусловленного обтеканием зоны пониженной магнитной проницаемости — трещины — внутри рельса (в реальности оператор видит двусторонний положительно-отрицательный сигнал дифференциального датчика, отражающий изменение поля). Глубина залегания ( $d$ ) и высота трещины ( $h$ ) менялись в пределах  $0 \div 12$  и  $1 \div 12$  мм соответственно.

На рис. 6 изображены результаты расчета модели, выполненного методом конечных разностей: зависимость величины максимума тангенциальной составляющей поля от глубины залегания и высоты трещины. Значение постоянной компоненты поля над бездефектным рельсом принято за единицу. Случай  $d = 0$  соответствует выходу трещины на поверхность.



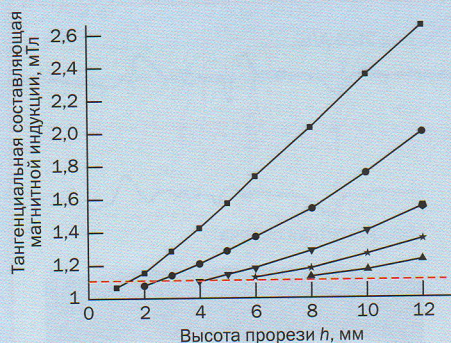


Рис. 6. Зависимость величины магнитной индукции от глубины залегания и высоты двумерной модели поперечной трещины:  
 — с выходом на поверхность ( $d = 0$ );  
 — в 2 мм под поверхностью;  
 — в 5 мм под поверхностью;  
 — в 8 мм под поверхностью;  
 — в 12 мм под поверхностью;  
 - - - предел обнаруживаемости

Как и следовало ожидать, амплитуда отклика от возмущения возрастает как при уменьшении глубины залегания, так и при увеличении высоты трещины. Если оценивать чувствительность системы регистрации в 10% от величины постоянной компоненты тангенциальной составляющей поля, то выше пунктирной линии находится область принципиальной выявляемости дефекта. То есть поперечная трещина высотой 3 мм может быть выявлена при глубине залегания менее 2 мм, высотой 10 мм — при глубине менее 12 мм (см. рис. 6).

Полученные расчетным путем результаты в основном подтверждаются при реализации магнитодинамического метода в рельсовой дефектоскопии. В качестве примера на рис. 7 приведены сигналы

магнитного (и ультразвуковых) канала от поперечной трещины в головке рельса на разной стадии развития: на стадии зарождения, когда верхний край трещины находится на глубине  $d = 8$  мм от поверхности катания; и на стадии излома рельса, когда после трех месяцев эксплуатации дефект вышел на поверхность катания ( $d = 0$ ). Видно, что амплитуда сигнала магнитного канала возросла многократно по сравнению с начальным значением, мало различимым на фоне сопутствующих скоростному контролю шумов, и хорошо выделяется при анализе сигналов.

Важным свойством сигналов магнитного канала является их хорошая воспроизводимость. Иначе говоря, вид сигналов определяется, прежде всего, внутренними характеристиками объектов рельсового пути и лишь в незначительной степени — условиями, в которых осуществлялась регистрация. Также воспроизводимость подразумевает устойчивость к параметрам намагничивающих и регистрирующих систем. То есть незначительные изменения в этих системах не приводят, опять же, к существенным искажениям в форме сигналов. Все это находит подтверждение на практике. На рис. 8 изображены сигналы от продольной трещины в головке рельса, полученные двумя различными вагонами с комплексом «АВИКОН-03» с временным промежутком в 25 дней. Схожесть сигналов свидетельствует, во-первых, о хорошей воспроизводимости сигналов магнитного канала и, во-вторых, о высокой культуре проектирования и производства, по-

зволяющей изготавливать комплексы с почти идентичными характеристиками.

Хорошая воспроизводимость сигналов делает магнитный канал пригодным для автоматической расшифровки. Действительно, повторяемость сигналов есть необходимое условие выявления классифицирующих признаков. В программно-аппаратный комплекс вагонов-дефектоскопов «АВИКОН-03» успешно внедрена система автоматической расшифровки данных магнитного канала. В настоящее время система ориентирована на выявление регулярных объектов рельсового пути — стыков различного вида и стрелочных переводов. Стыки классифицируются по следующим категориям: типовые болтовые стыки и изолирующие, сварные стыки, выполненные электроконтактной сваркой, и алюминотермитные. Расшифровка осуществляется непосредственно в процессе проезда в режиме реального времени (рис. 9).

Селекция стыков и других конструктивных элементов рельсового пути производится по специфическим признакам сигналов магнитного канала дефектоскопического комплекса «АВИКОН-03М». В протоколе изолирующих стыков с указанием координаты стыка и нитки пути предусмотрена возможность дополнения дефектограммы тремя фотокадрами стыка, полученными с разных ракурсов.

В перспективе планируется дополнить существующую систему распознавания возможностью выявлять сигналы от опасных дефектов, а также определять некоторые числовые параметры обнаруженных объектов.

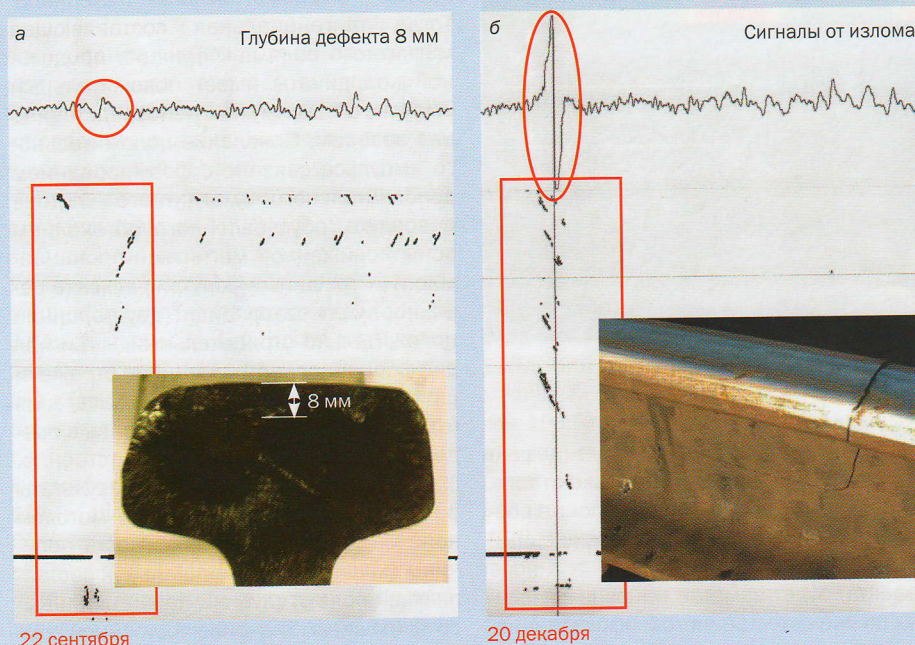


Рис. 7. Сигналы от поперечной трещины в головке рельса на разных стадиях развития: а — за три месяца до излома (верхний край трещины на глубине 8 мм от поверхности катания); б — поперечный излом рельса

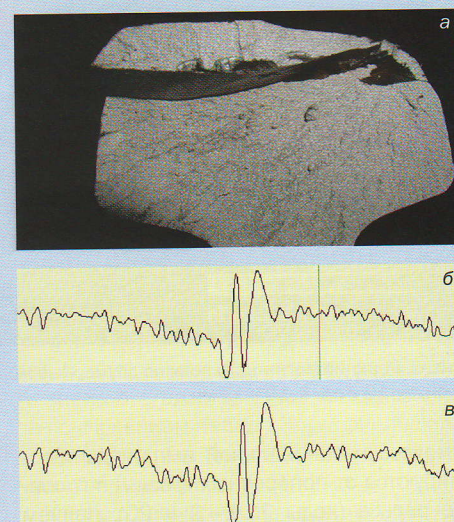


Рис. 8. Сигналы от горизонтальной трещины в головке рельса, зафиксированные разными вагонами-дефектоскопами с комплексом «АВИКОН-03» с временным интервалом 25 дней: а — тип трещины (дефект кода 30Г по [3]); б — дефектограмма вагона-дефектоскопа № 480 (1997 г. выпуска); в — дефектограмма вагона № 494 (2011 г. выпуска)



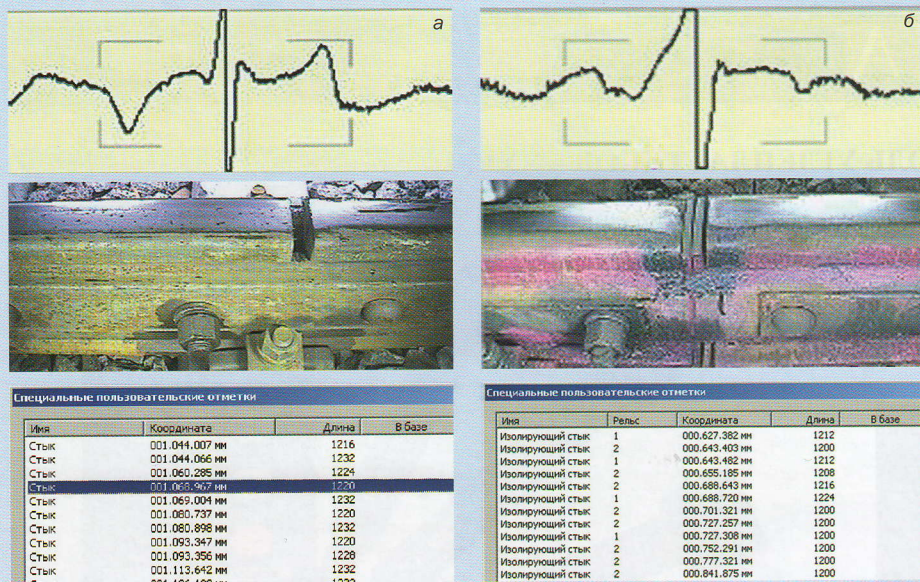


Рис. 9. Автоматическое выделение стыков рельсов с формированием отдельных протоколов:  
а — болтовых; б — изолирующих

Таким образом, магнитодинамический метод контроля, реализованный в дефектоскопических комплексах совмещенных вагонов-дефектоскопов, обладает рядом положительных качеств, позволяющих не только дополнять ультразвуковые методы контроля, повышая надежность и вероятность обнаружения дефектов [7],

но и выступать как самостоятельный метод контроля при экстремальных условиях (низкие температуры, высокие скорости) эксплуатации железнодорожных путей.

Исторически магнитодинамический метод был первым методом, массово применявшимся в скоростной дефектоскопии рельсов. За многие годы эксплуатации он

доказал свою эффективность. В отдельных, часто экстремальных случаях, магнитный канал СВД является единственным, своевременно обнаруживающим дефекты критических размеров [7]. Дальнейшее развитие магнитодинамического метода способно придать новый импульс рельсовой дефектоскопии в целом.

## Литература

1. Гурвич А.К., Довнар Б.П., Козлов В.Б. и др./Под ред. А.К. Гурвича. Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте. — М.: Транспорт, 1983. — 318 с.
2. Магнитные дефектоскопы изобретателя Ф. М. Карпова. — М.: ВНТМ, 1939.
3. НТД/ЦП 1-2-3-93. Классификация дефектов рельсов. Каталог дефектов рельсов. Признаки дефектных и остродефектных рельсов. — М.: Транспорт, 1983.
4. Халилеев П.А. Рождение рельсовой дефектоскопии. — Дефектоскопия. 1999. № 12. С. 73 — 82.
5. Кононов О.А., Осипов В.В., Марков А.А. и др. Дефектоскопический комплекс магнитного вагона-дефектоскопа. — Путь и путевое хозяйство. 2000. № 5. С. 23 — 25.
6. Антипов Г.А. Марков А.А. Современное состояние и перспективы развития магнитных методов контроля рельсового пути. — В кн. Современные технологии извлечения и обработки информации. — СПб.: ОАО «Радиоавионика», 2001, с. 45 — 52.
7. Метелкин А.П. Комплексное использование методов контроля — путь к повышению эффективности дефектоскопии рельсов. — В мире НК. 2005. № 2 (28). С. 65 — 67.

Статья получена 6 августа 2012 г.



**Амати-Акустика**

Разработка и производство  
ультразвуковых преобразователей

комплексные поставки оборудования НК, испытательная лаборатория, учебный центр

**+7 (812) 309-05-28**

<http://amatia.ru>

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО

**УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**



Санкт-Петербург, ул. Мебельная, д. 12  
тел.: +7 (812) 309-05-28, факс: +7 (812) 740-17-03

[ndt@amatia.ru](mailto:ndt@amatia.ru)