

Комплексный анализ состояния рельсового пути с помощью нового вагона-дефектоскопа АВИКОН-03М

Марков А. А.

Директор НТК систем неразрушающего контроля.
Доктор технических наук.



Е.А. Кузнецова

Ведущий инженер НТЦ РСиП СНК.
Окончила кафедру «Радиоэлектронные системы управления» Балтийского государственного технического университета («Военмех»).
В ОАО «Радиоавионика» с 2004 г.
Диплом победителя Всероссийского конкурса «Инженерное искусство молодых-2010».
Лауреат Молодежной премии С-Петербурга-2010 в области науки и техники.



Приведено краткое описание модернизированного вагона-дефектоскопа АВИКОН-03М с расширенными функциональными возможностями. Рассмотрены примеры комплексного анализа получаемой вагоном диагностической информации. Выполнена оценка повышения вероятности обнаружения дефектов рельсового пути за счет развития систем диагностики вагона-дефектоскопа.

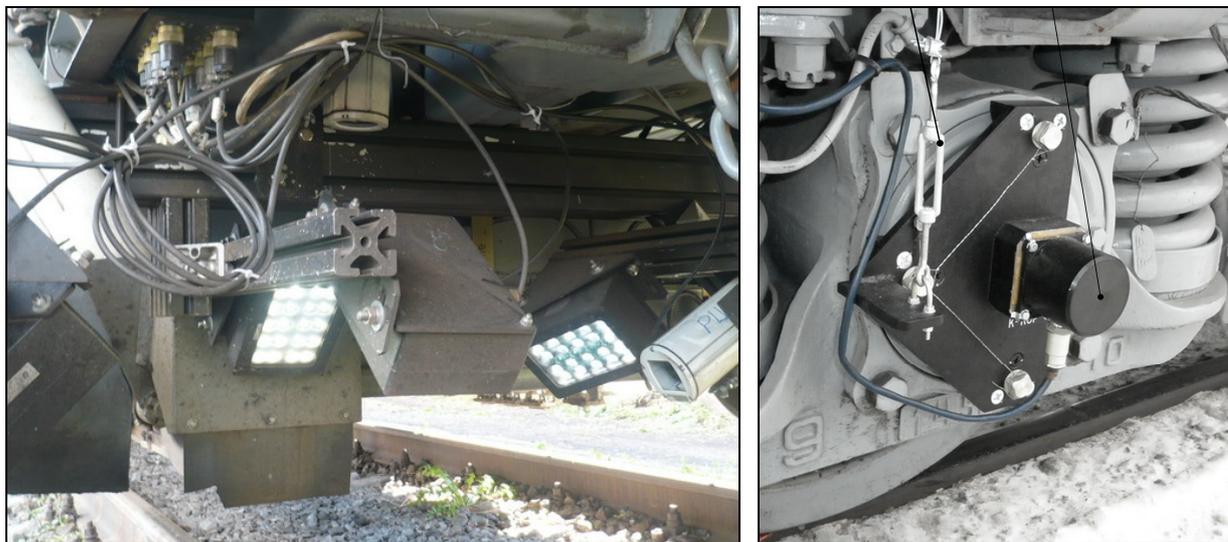
1. Модернизированный вагон-дефектоскоп АВИКОН-03М

С мая 2011 г. на Октябрьской железной дороге начал эксплуатироваться новый вагон-дефектоскоп АВИКОН-03М с расширенными функциональными возможностями, разработанный ОАО «Радиоавионика» по заказу ОАО «РЖД».

Диагностический комплекс вагона дополнен двумя новыми системами (рис.1):

- 12-канальной системой видеорегистрации (6 камер для получения изображения рельсов с нескольких ракурсов и 6 обзорных камер);

- системой измерения отдельных геометрических и динамических параметров рельсового пути с помощью инерциальных измерительных модулей (см. рис. 1б).



а)
б)
Рис. 1. Дополнительное диагностическое оборудование нового вагона-дефектоскопа АВИКОН-03М: а – видеосистема; б - микромеханический инерциальный измерительный датчик на буксе колеса

При этом в дополнение к ранее используемым ультразвуковым и магнитным методам неразрушающего контроля (НК) впервые полноценно реализованы еще два метода контроля рельсового пути:

- визуальный (по три видеокамеры на каждую нитку пути – см. рис. 1а);
- инерциальный метод обнаружения коротких неровностей рельсового пути.

Наиболее сложной задачей, успешно решенной разработчиками данных систем и их программного обеспечения, является корректная жесткая синхронизация всей получаемой вагоном-дефектоскопом диагностической информации по координате рельсового пути.

При этом оператор имеет широкие возможности вывода на экран всей или частичной информации для принятия обоснованного решения о состоянии контролируемого сечения.

На рис. 2 приведен пример записи болтового стыка с совместным представлением сигналов магнитодинамического канала (поз.1), 12-ти ультразвуковых каналов (поз. 2) и трех кадров с изображением стыка (поз. 3). 12-ти канальная схема прозвучивания комплекса АВИКОН-03М содержит для

контроля головки рельса: по два эхо-канала 70° , четыре канала $58/34^\circ$ (схема «РОМБ»), два зеркальных канала $58/34^\circ$, для контроля шейки и ее продолжений в головку и подошву – два эхо-канала 42° и для контроля всего сечения рельсов – два прямых каналов 0° .

Такое полное представление информации позволяет не только выявить наличие дефектов рельсов, но и оценить состояние поверхности катания рельсов, измерить величину стыкового зазора, зафиксировать наличие возможной «ступеньки» в стыке, оценить состояние рельсовых скреплений, шпал, щебенки в межпшальном ящике и др.

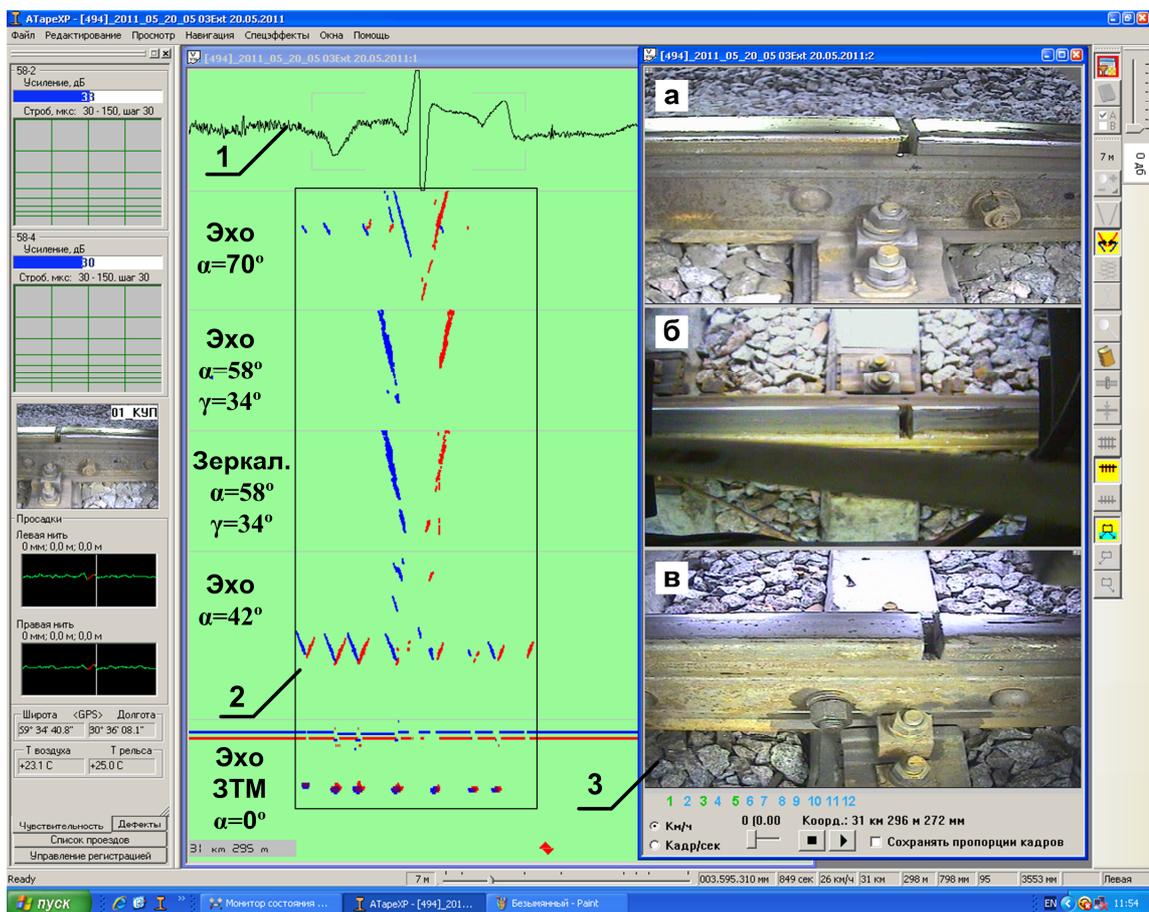


Рис. 2. Совместный анализ сигналов трех методов НК: 1 – магнитного; 2 – ультразвуковых (12 каналов) и 3 – визуального (3 камеры на рельс: с внутренней стороны колеи (а), сверху (б) и с наружной стороны (в))

2. Результаты комплексного анализа видео и дефектоскопической информации

Ниже приведены некоторые примеры и характерные фрагменты, поясняющие дополнительные возможности по анализу сигналов и

идентификации дефектов с помощью сочетания трех методов НК (магнитного, ультразвукового и визуального).

2.1. Дифференциация дефектов на неопасные поверхностные повреждения головки рельсов и недопустимые внутренние дефекты

Зачастую, при анализе дефектограмм, только лишь по сигналам в магнитном и ультразвуковых каналах практически невозможно сделать однозначный вывод о том, какой дефект имеется на данном участке: допустимый дефект первой группы или опасная внутренняя трещина головки рельса. И в том, и в другом случае в магнитном канале отображаются сигналы, характерные для дефекта головки (рис. 3 поз 1), в наклонных каналах контроля головки рельса присутствуют наклонные пачки (поз. 2), в прямом канале фиксируются эхо-сигналы и наблюдается прерывание линии донных сигналов (поз. 3). При этом только по дефектоскопическим сигналам дефект будет идентифицирован оператором скорее как опасная внутренняя трещина головки рельса (принятие решения оператором весьма субъективно).

При наличии видеоизображения (рис. 3: поз. 4) расшифровщик может мгновенно распознать, что подозрительные сигналы получены, например, от развитого поверхностного повреждения (расслоения, выкрашивания металла головки или пробуксовки как на рис.3).

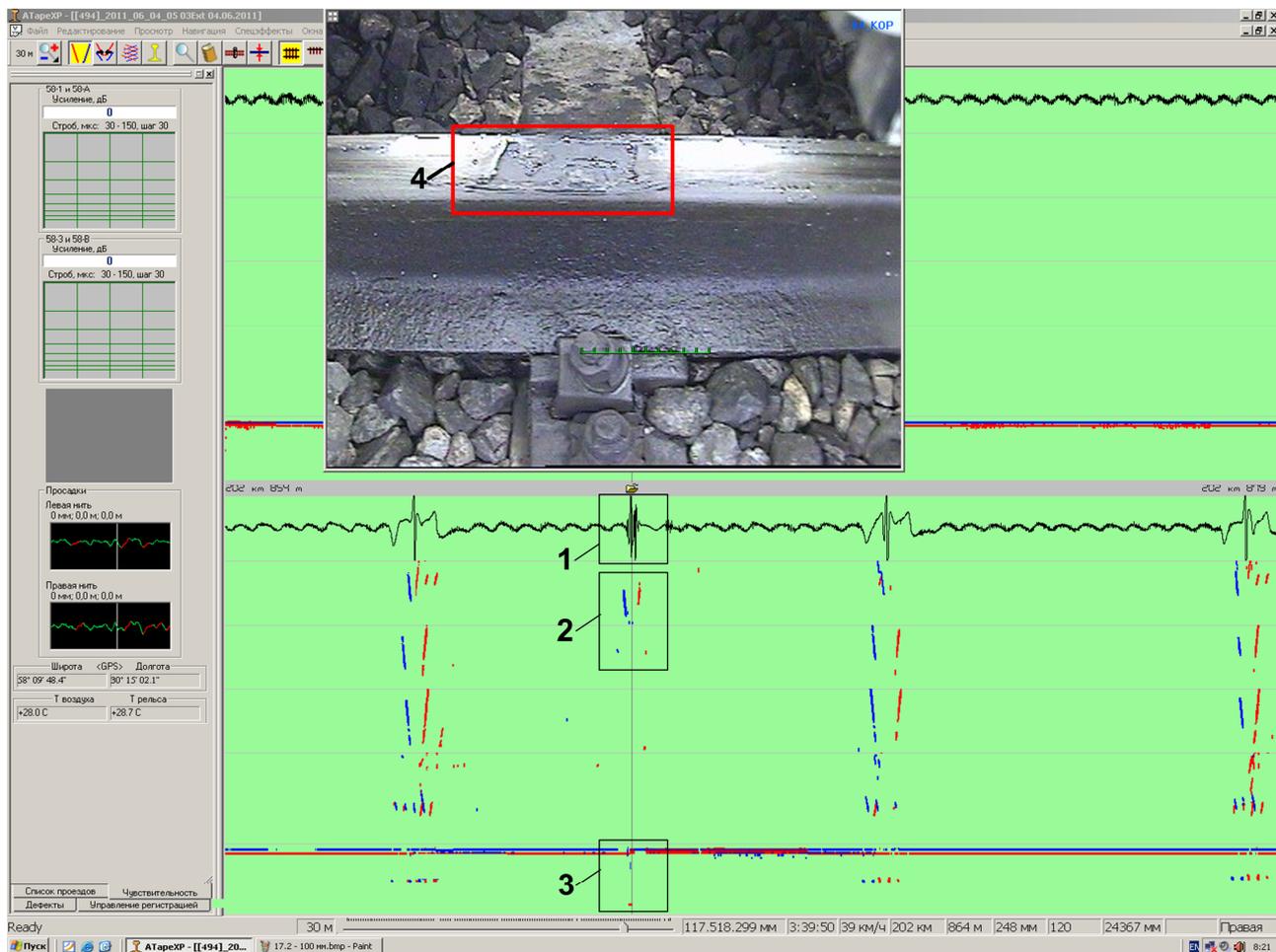


Рис.3. Пример распознавания по видеокдрам поверхностного дефекта (по дефектоскопическим сигналам идентифицируется как внутренний дефект)

Напротив, наличие сигналов в ультразвуковых и магнитном каналах при отсутствии на фотоизображении внешних повреждений рельсов, говорит о большой вероятности присутствия опасного внутреннего дефекта рельса (ОДР).

2.2. Распознавание сигналов от реальных дефектов и дефектоподобных сигналов от конструктивных отражателей рельсов (маркировочных знаков, одиночных или дополнительных отверстий в шейке и др.).

Подобные сигналы увеличивают трудоемкость расшифровки и вызывают необходимость вторичных перепроверок с выходом в путь (для этих целей обычно привлекаются операторы цехов дефектоскопии). При этом значительно удлиняется время выдачи окончательного заключения о качестве проконтролированного участка и возрастает трудовая нагрузка на цеха.

На рис. 4 представлен пример сигналов, аналогичных ОДР кода 55 (трещины в шейке рельса), которые, на самом деле, получены от одиночного отверстия в шейке рельса, что четко видно по фотоизображению.

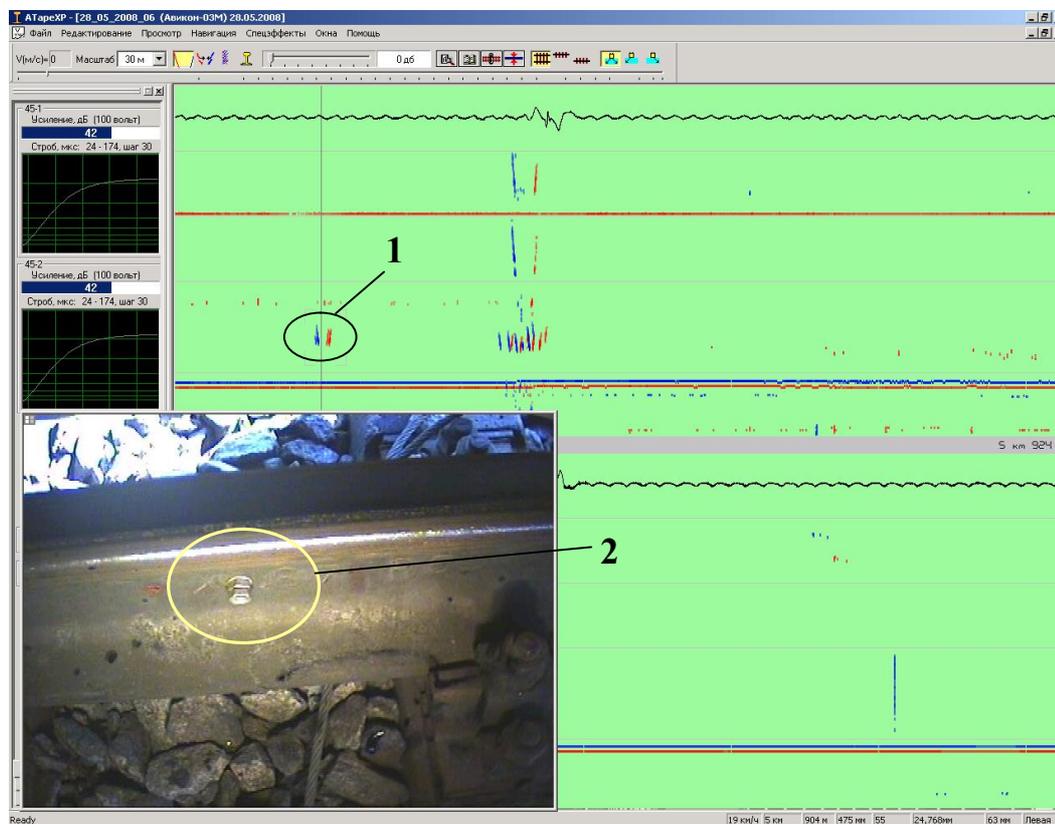


Рис. 4. Опровержение с помощью визуального метода предположения о наличии опасного дефекта шейки (кода 55), сделанного на основании данных ультразвуковых каналов: 1 – наклонные пачки сигналов в эхо-каналах контроля шейки; 2 – фотоизображение рельса с одиночным отверстием в шейке.

2.3. Упрощение анализа сигналов в зоне стрелочных переводов.

В данной зоне анализ сигналов может вызывать затруднения у оператора из-за сложности конструкции стрелочного перевода и наличия множества конструктивных отражателей в его элементах (технологические отверстия в крестовине, сигналы от врезки усовика и т.д.). Кроме того, профили острияков, рамных рельсов (в зоне строжки) и крестовин отличаются от профиля обычных рельсов. Проблема усугубляется тем, что в литературе и нормативных инструкциях практически отсутствуют рекомендации по расшифровке сигналов в данной зоне. Благодаря видеорегистрации рельсового пути существенно упрощается идентификация сигналов от различных элементов в зоне стрелочного перевода.

2.4. Предотвращение пропусков ОДР и изломов в зоне алюминиотермитных сварных стыков рельсов.

В России алюминиотермитные сварные стыки по действующей технологии принято устанавливать в накладки. Пропуски происходят из-за того, что совокупность сигналов от болтовых отверстий в рельсах и пачек сигналов от дефекта (рис. 5 а) или излома по всему сечению в зоне сварки могут быть ошибочно распознаны расшифровщиком как обычный болтовой стык. Эта ситуация является крайне опасной, в связи с тем, что вместе с рельсом легко ломаются и стыковые накладки (конструкция накладки ослаблена из-за выточки под валик усиления сварного стыка).

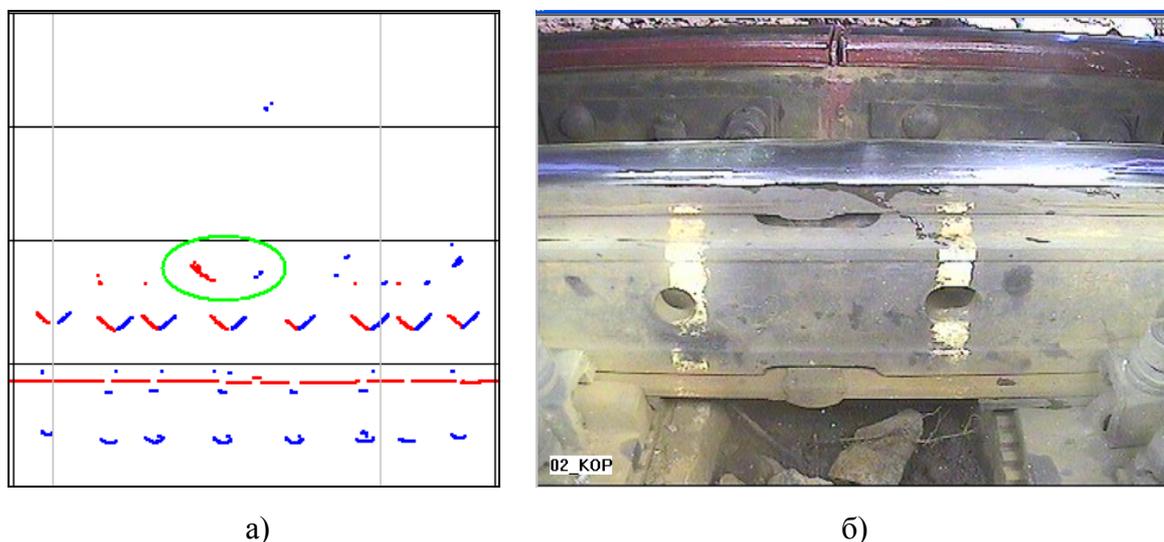


Рис. 5. Алюминиотермитный сварной стык: а – сигналы от опасной трещины в подошве рельсов в зоне сварки; б – видеокадр, идентифицирующий наличие сварного стыка.

2.5. «Привязка» дефектограмм к реальному пути.

Отдельная проблема организации неразрушающего контроля рельсов – ошибки при выдаче на натурный осмотр координаты дефектного сечения (привязка сигналов). Ежегодно на сети дорог 20-30% от всех изломов происходит из-за пропусков операторами, в том числе, из-за ошибок при поиске отметки в пути и при проведении натурального осмотра.

Отсутствие на дефектограммах мобильных средств отметок пикетных столбов, погрешность датчика путевой координаты (может составлять несколько единиц и десятков метров), ошибки определения номера звена и

нити пути могут привести к пропуску опасного дефекта. Особенно эта проблема актуальна при контроле бесстыкового пути, где отсутствуют такие регулярные типовые отражатели, как болтовые стыки.

Указанные проблемы решаются благодаря наличию видеоинформации. Например, по фотоизображению рельса с внутренней стороны колеи четко видны номера сварных стыков и маркировка на рельсах, по которым расшифровщику удобно осуществить точную привязку дефектного сечения, а оператору – найти правильную координату при натурном осмотре в пути. Дополнительно, на вагоне-дефектоскопе установлено шесть обзорных камер, которые обеспечивают четкую запись элементов пути и объектов инфраструктуры. Эти объекты позволяют произвести дополнительную привязку дефектного сечения к местности.

2.6. Дополнительные возможности.

- Выявление по фотоизображению опасных трещин рельсов с выходом на поверхность, требующих принятия немедленных мер по ограничению скорости и замене рельса.

- Выявление дефектов и изломов на неконтролируемых зонах стрелочных переводов.

- Выявление дефектов поверхности катания рельсов (в сочетании с данными магнитного и ультразвуковых каналов, а также буксовых микромеханических датчиков) с возможностью измерения их параметров и наблюдение за динамикой их развития.

- Определение факта контроля и даты последнего осмотра дефектных рельсов, подозрительных сечений и непроконтролированных болтовых стыков, выданных на вторичный осмотр по результатам проезда вагона-дефектоскопа. По маркировке, оставленной на рельсе оператором вторичного контроля, инженер-расшифровщик мобильного средства контролирует работу цехов дефектоскопии по осмотру и наблюдению за выданными вагоном отметками, а также по регулярному осмотру (мониторингу) дефектных рельсов (ДР).

- Выявление (совместно с данными путеизмерений) причин появления на дефектограммах частично или полностью непроконтролированных

болтовых стыков из-за наличия просадок, ступенек, смятий и выкрашиваний головки рельса; непроконтролированных сварных стыков из-за седловин; а также непроконтролированных участков из-за сильного бокового или волнообразного износа рельсов.

- Быстрое самообучение и повышение квалификации специалистов по расшифровке, а также минимизация ошибок благодаря регулярному сравнению сигналов на дефектограммах и фотоизображению рельсов с разнообразными отражателями в них.

2.7. Обнаружение неисправностей рельсового пути

Получение информации от 12 камер видеосистемы вагона-дефектоскопа АВИКОН-03 открывает уникальные возможности по выявлению различных неисправностей пути и элементов инфраструктуры. Разрешающая способность получаемых изображений позволяет обнаруживать по видеокадрам имеющиеся неисправности (пример – на рис.6). Очевидно, на участках с плохим содержанием пути вероятность появления дефектов рельсов больше, чем на участках с нормативным содержанием. Поэтому и здесь прослеживается косвенная связь повышения достоверности обнаружения дефектов рельсов в связи с внедрением видеорегистрации с высоким разрешением.

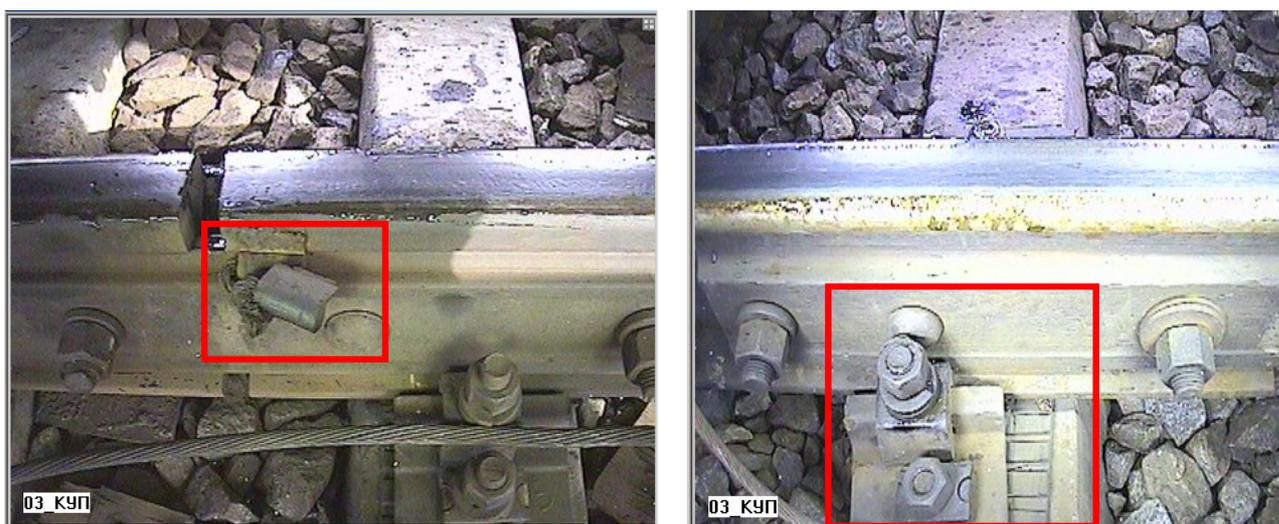


Рис. 6. Примеры выявленных по видеокадрам неисправностей рельсового пути

Таким образом, дополнение дефектоскопического комплекса системой видеоконтроля рельсов, в первую очередь, позволяет повысить эффективность дефектоскопии рельсов: с одной стороны – выявлять дополнительные дефекты, а с другой стороны – минимизировать количество необоснованно выдаваемых на вторичный осмотр отметок и снизить перебраковку рельсов, а, значит, существенно уменьшить издержки при сохранении требуемого уровня безопасности.

3. Система измерения геометрических параметров пути

Следующим шагом в построении эффективной системы диагностики рельсового пути является дополнение дефектоскопической информации параметрами геометрии рельсового пути.

Известно, что непосредственное влияние на зарождение и ускоренное развитие внутренних дефектов рельсов оказывают нарушения геометрии рельсового пути и наличие неровностей на поверхности катания рельсов. Из-за указанных нарушений в рельсах возникают дополнительные знакопеременные напряжения – это собственные напряжения рельса вследствие его изгиба на неровности и дополнительные динамические напряжения, возникающие в рельсе при проходе подвижного состава по неровностям.

Основными неисправностями колеи, влияющими на развитие дефектов в рельсах, являются короткие неровности в вертикальной плоскости, то есть просадки и перекосы пути. Предварительные расчеты показывают, что при наличии просадок растягивающие напряжения в головке и подошве рельса увеличиваются примерно в два раза на неисправностях второй степени, и до трёх-четырёх раз при наличии неисправностей четвертой степени. Это вызывает ускорение интенсивности роста трещин в несколько раз [1].

Наличие дефектов и неровностей на поверхности катания головки рельсов (пробуксовки, выкрашивания, смятия, седловины, волнообразный износ и др.), аналогично, вызывает дополнительное силовое воздействие на путь и способствует появлению опасных внутренних дефектов рельсов.

В связи с этим, диагностический комплекс вагона-дефектоскопа АВИКОН-03М имеет в своем составе систему измерения отдельных

геометрических и динамических параметров – Мобильную инерциальную систему диагностики рельсового пути (МИСД РП).

Для регистрации коротких вертикальных неровностей рельсовых ниток (коротких просядок длиной от 0,6 м) и неровностей поверхности катания рельсов на буксовых узлах колес ходовой тележки вагона-дефектоскопа смонтированы четыре микромеханических инерциальных измерительных модуля (акселерометров).

На рис.7 в качестве примера представлены зарегистрированные микромеханическими датчиками сигналы от неровности поверхности катания рельсов в зоне сварного стыка (дефект 46.3). На верхнем графике отображаются вертикальные ускорения буксовых датчиков, и виден скачок вниз (провал) колес в момент прохождения неровности (рис. 7а). На нижнем рисунке (рис. 7г) – схематично отображена выявленная неровность в виде треугольника, вершина которого направлена вниз, поскольку неровность представляет собой седловину.

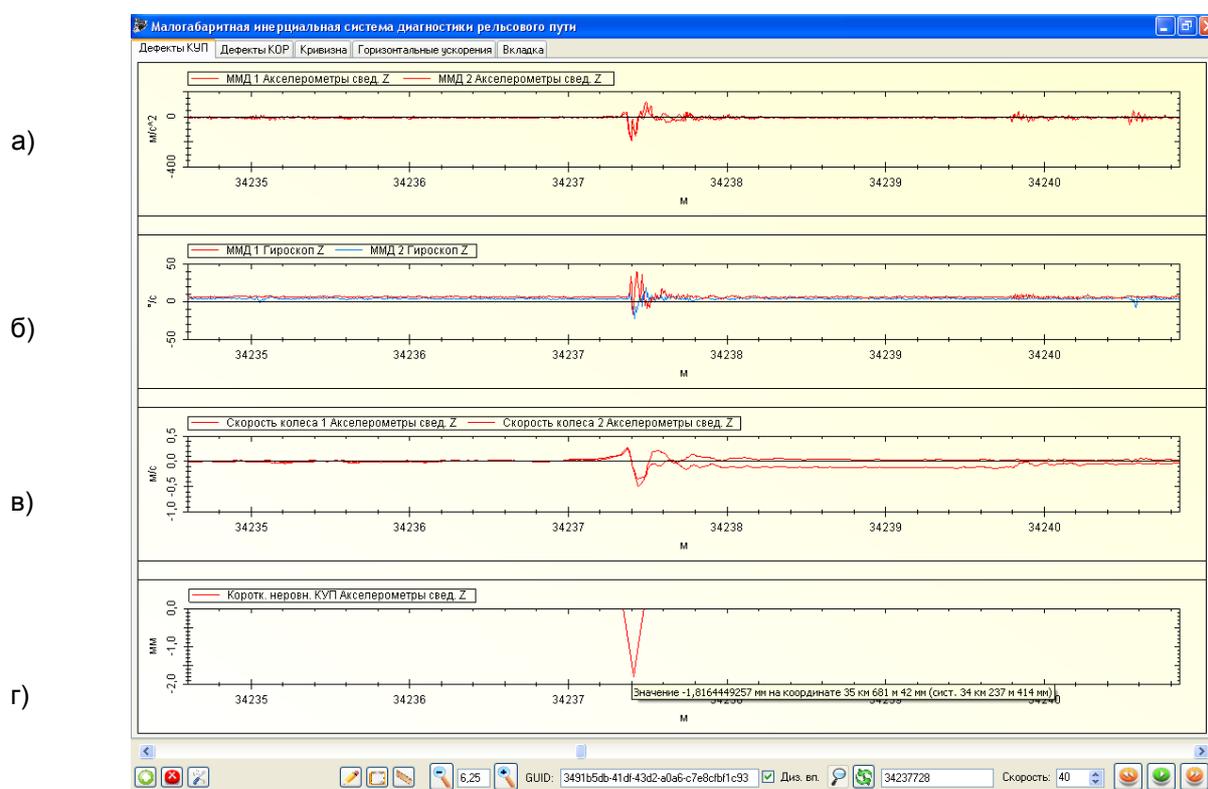


Рис.7. Сигналы системы МИСД РП от неровности на поверхности катания рельса: а – график вертикальных ускорений колеса, m/s^2 ; б – показания микромеханических гироскопов; в – вертикальная скорость колеса, m/s ; г – условное отображение неровности, mm

В результате математической обработки сигналов микромеханических

датчиков программное обеспечение системы МИСД РП автоматически формирует список всех выявленных локальных участков с повышенным динамическим воздействием на рельсы. Параметры выявленных неровностей и их координаты определяются в программе автоматически.

Естественно, результаты измерения вертикальных неровностей рельсового пути полностью синхронизированы с дефектоскопическими сигналами и видеоинформацией и могут быть проанализированы для комплексной оценки состояния контролируемого сечения.

В состав системы МИСД РП входит также блок инерциальной навигационной системы (волоконно-оптический инерциальный измерительный модуль) БИНС. Он позволяет производить измерения таких геометрических параметров рельсового пути как кривизну пути в плане, короткие перекосы на базе ходовой тележки, длинные неровности в продольном профиле и в плане, продольный уклон и др.

Выявление участков пути с повышенными динамическими нагрузками (по причине отступления от норм геометрических параметров) позволит сформировать дополнительные критерии при оценке опасности обнаруженных методами дефектоскопии дефектных сечений рельсов, т.к. потенциально опасные дефекты на таких участках развиваются более интенсивно. Также появляется возможность локализовать участки с неисправностями пути, на которых в будущем возможно зарождение внутренних дефектов рельсов.

4. Повышение вероятности обнаружения дефектов

Таким образом, мы видим поэтапное развитие систем диагностики рельсов, реализуемых на вагонах-дефектоскопах АВИКОН-03.

На первом этапе в 1993 – 1997 г.г. впервые силами сотрудников ОАО «Радиоавионика» реализован совмещенный режим работы вагона-дефектоскопа (совмещение ультразвуковых и магнитодинамического методов НК).

На последующих этапах (2003 – 2008 г.г.) внедрялась двухканальная система видеорегистрации рельсового пути (одна камера на одну нитку).

С 2009 г. по настоящее время система видеорегистрации рельсов модернизирована – она стала шестиканальной (плюс шесть обзорных камер). Дополнительно на вагон-дефектоскоп введена инерциальная система измерения отдельных геометрических и динамических параметров железнодорожного полотна, влияющих на развитие внутренних дефектов рельсов.

Рассчитаем вероятность обнаружения дефектов комплексом из n систем по известному выражению:

$$P = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot \dots \cdot (1 - P_n), \quad (1)$$

где P – вероятность обнаружения дефекта комплексом методов, P_n – вероятность обнаружения дефекта n -ным методом.

Для расчета эффективности обнаружения дефектов при применении комплекса систем примем следующие начальные условия (табл. 1), полученные экспертным путем:

Таблица 1

№	Методы	Вероятность обнаружения дефекта данным методом, P
1	Ультразвуковые (8-ми канальная схема прозвучивания)	$P_{УЗ(8)} = 0.85$
2	Ультразвуковые (12 каналов)	$P_{УЗ(12)} = 0.93$
3	Магнитодинамический	$P_M = 0.3$
4	Визуальный (1 канал на нитку)	$P_{В(1)} = 0.1$
5	Визуальный (3 канала с доп. освещением)	$P_{В(3)} = 0.3$
6	Инерциальный (динамические и геометрические неровности рельсового пути)	$P_{И} = 0.2$

В табл. 2 приведены результаты расчета по приведенному выражению (1) повышения вероятности обнаружения дефектов вагоном-дефектоскопом АВИКОН-03М при развитии систем диагностики:

Таблица 2

Методы контроля	Расчетная вероятность обнаружения дефекта, P
УЗ(8) + МАГН	0.895
УЗ(8) + МАГН + ВИДЕО(1)	0.906
УЗ(12) + МАГН + ВИДЕО(1)	0.956
УЗ(12) + МАГН + ВИДЕО(3) + ИНЕРЦ	0.961

Рассчитаем эффект от развития систем диагностики рельсов в количественном выражении.

В качестве примера рассмотрим статистику ОАО «РЖД» по дефектам за 2010 г. Всеми средствами дефектоскопии на действующих путях было обнаружено 38 422 остродефектных рельсов.

Так как дополнительные системы диагностики вагона-дефектоскопа в первую очередь ориентированы на более надежное выявление дефектов в головке рельсов (магнитный метод, 70° преобразователи у.з.к., видеоизображение поверхности катания рельсов), то рассмотрим возможности повышения вероятности обнаружения дефектов в данном сечении.

Из рассмотренного общего количества обнаруженных дефектов более 68% (26 264) являются дефектами в головке рельса.

Наращивание систем диагностики рельсов дополнительными измерителями приводит к заметному увеличению вероятности обнаружения дефектов (с 0,9 до 0,96), что равносильно дополнительному обнаружению недопустимых дефектов головки рельсов более чем на 1 700 шт.

Естественно, существенный вклад в указанное приращение вносит увеличение количества каналов ультразвукового метода. Увеличение с 8 до 12 ультразвуковых каналов на каждую нитку пути поможет дополнительно выявить до 1 300 дефектов.

Из расчетов следует, что дополнение датчиков измерения неровностей рельсов в настоящее время не привело к существенному увеличению обнаружения дефектов (см. табл. 2). В то же время, необходимо учесть, что наличие на поверхности катания заметных неровностей (глубиной более 1 мм)

приводит к увеличению динамического воздействия колес проходящих составов на конкретное сечение рельса. Это воздействие должно быть учтено при автоматизации расшифровки дефектограмм путем изменения весовых коэффициентов дефектоскопических сигналов в сторону увеличения. По мере наработки опыта использования инерциальной системы перечень измеряемых параметров геометрии пути будет расширяться, что дополнительно повысит надежность диагностики рельсов в пути.

Подводя итог, можно отметить, что поэтапно развивая системы измерения вагона-дефектоскопа и расширяя их номенклатуру, достигается повышение вероятности обнаружения дефектов рельсового пути практически до предельного значения.

Эволюция возможностей вагона-дефектоскопа производства ОАО «Радиоавионика» наглядно демонстрируется гистограммой, приведенной на рис. 8.

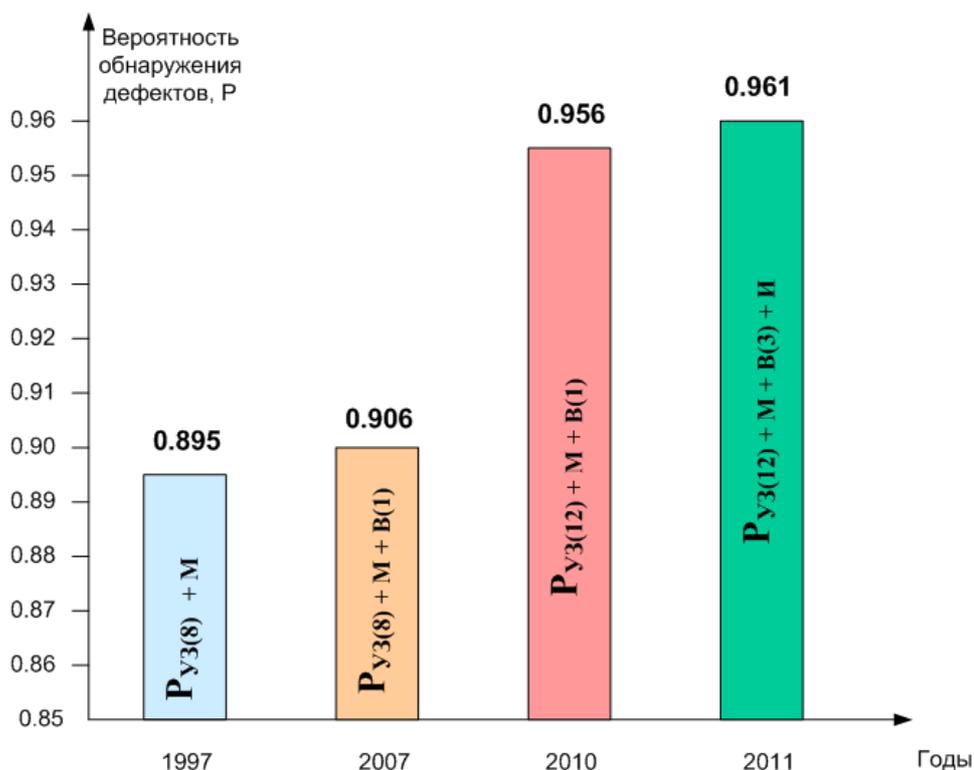


Рис.8. Изменение (расчетное) вероятности обнаружения дефектов комплексом АВИКОН-03М по мере развития диагностических систем

Анализ известных мобильных систем диагностики показывает, что

комплекс вагона-дефектоскопа АВИКОН-03М, описанный выше, является одним из наиболее функциональных и эффективных на мировом рынке.

В то же время возможности дальнейшего развития мобильных средств диагностики еще не исчерпаны. Требуется разработка технологии использования получаемой вагоном комплексной информации и процедур автоматизации обработки данных для постепенного перехода к мониторингу состояния рельсового пути.

Литература:

1. Бельтюков В.П., Марков А.А. Комплексная оценка состояния пути. Радиоэлектронные комплексы многоцелевого назначения: сборник научных трудов: юбилейный выпуск, 1991 – 2006 / ОАО «Радиоавионика» – СПб: Береста, 2006. – 346 с.