

## ПОВЫШЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В РЕЛЬСАХ



**А. А. Марков,**  
д-р техн. наук,  
ОАО «Радиоавионика»,  
Санкт-Петербург, Россия.  
E-mail: amarkovspb@gmail.com

На базе анализа сложившейся технологии рассмотрены история развития, современное состояние и новые требования по дефектоскопии железнодорожных рельсов. Приведен перечень задач, решаемых при неразрушающем контроле рельсов. Для конкретизации решаемых задач впервые предложено рассматривать вероятности обнаружения дефектов в сечении рельсов по определенным зонам. Наибольшее количество отказов рельсов (до 70 %) происходит по поверхностным и внутренним дефектам головки рельсов. Показано, что для поверхностных зон, в дополнение к ультразвуковым методам, можно эффективно применять магнитодинамический и визуальный методы контроля. Совместный анализ результатов видеорегистрации, сигналов магнитодинамического и ультразвукового методов дает синергетический эффект и обеспечивает максимальную вероятность обнаружения дефектов. При поиске дефектов в глубинных слоях используются разные способы и схемы прозвучивания ультразвукового метода. Для контроля участков пути с поврежденными поверхностями рельсов эффективно применение ультразвуковых колесных преобразователей с упругой оболочкой. Приведена информация о приборах и комплексах дефектоскопии рельсов, в том числе о дефектоскопе-томографе, измеряющем размеры трещины. Показано, что только комплексное применение методов обеспечивает требуемую достоверность как при контроле рельсов в пути, так и на рельсово-вагонных предприятиях.

**Ключевые слова:** рельсовая дефектоскопия, неразрушающий контроль, ультразвуковые методы, магнитодинамический метод, визуальный метод, поперечная трещина, вероятность обнаружения, размер трещины.

A. A. Markov (Radioavionica Corporation, Saint-Petersburg, Russia)

### INCREASING THE PROBABILITY OF DETECTION OF CRACKS IN RAILS

The article considers the history, modern state and new demands for detection of the cracks in rails according to the current railroad inspection technology. The objectives of non-destructive rail testing are enumerated. For the first time we offer to associate a probability of detection of defects with areas of cross-section in the rail. The most of rail failures (up to 70 %) are resulted from the surface and internal rail head flaws. It is shown that the Magnetic Flux Leakage (MFL) and visual methods can be effectively applied to the surface areas in addition to the ultrasonic method. The joint analysis of video, MFL and ultrasonic data gives a synergistic effect and essentially increases the defect detection probability. To detect deep-seated defects the various ultrasonic techniques are applied. The ultrasonic wheel transducers with an elastic shell are effectively used to evaluate the rail surface. The information about various non-destructive rail testing equipment including innovative ultrasonic tomograph with defect sizing capability is presented. It is shown that only joint application of non-destructive methods ensures adequate detection reliability as applied both to track-laid rail and at rail welding facilities.

**Keywords:** rail NDT, non-destructive testing, ultrasonic methods, magnetic flux leakage method, visual method, transverse crack, detection probability, crack sizing.



Статья поступила в редакцию 09.06.2016

Received 09.06.2016

#### Действующая система неразрушающего контроля рельсов

С развитием технологии содержания рельсовых путей, с освоением производства более качественных рельсов меняются и требования к их диагно-

стике. Еще 20 лет назад о совмещении в одном диагностическом комплексе ультразвуковых (УЗ) и магнитодинамических (МД) методов контроля лишь мечтали. Сегодня каждое мобильное средство дефектоскопии является совмещенным, реализуя од-

## Библиографический список

1. Бирюзов В. П. Об основных направлениях развития систем диагностики и мониторинга путевого хозяйства до 2025 г. // Путь и путевое хозяйство, 2015. № 4. С. 4 – 8.
2. Признаки дефектных и остродефектных рельсов: ИТД/ЦП-3-93. М.: Транспорт, 1993.
3. Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов». Утв. ОАО «РЖД» распоряжением № 2499 р от 23.10.2014. М., 2014. 140 с.
4. Мазов Ю. Н., Сычев В. П. Обоснование классификации и сроков замены остродефектных рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 8. С. 2 – 6.
5. Шур Е. А. Повреждения рельсов. М.: Интекст, 2012. 192 с.
6. Рейхарт В. А. Анализ дефектов в рельсах // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 4. С. 20 – 25.
7. Иванов П. С., Зайцев Н. И., Кремнев Е. А., Гайворонский В. П. Анализ дефектов рельсов // Железнодорожный транспорт. 2010. № 10. С. 58 – 60.
8. Бели Я., Немет И. Контактно-усталостные трещины головки рельса // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 3. С. 33 – 37.
9. Усталостные повреждения рельсов // Железные дороги мира. 2011. № 6. С. 69 – 75.
10. Пат. на изобр. № 2545493. Способ ультразвукового обнаружения микротрещин на рабочей выкружке головки рельса / А. А. Марков, В. В. Мосягин, А. Ю. Веревкин. Опубл. 10.04.2015 // Бюл. 2015. № 10.
11. Марков А. А. Зарубежные системы контроля рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2010. № 9. С. 32 – 40.
12. Гурвич А. К., Довнар Б. П., Козлов В. Б. и др. Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте / под ред. А. К. Гурвича. М.: Транспорт, 1983. 318 с.
13. Марков А. А., Полигай П. Г., Маховиков С. П. и др. Комплексный анализ состояния рельсового пути с помощью нового вагона-дефектоскопа «АВИКОН-03» // В мире неразрушающего контроля. 2013. № 3. С. 74 – 79.
14. Марков А. А., Кузнецова Е. А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Книга 1. Основы. СПб.: КультИнформПресс, 2010. 290 с.
15. Марков А. А., Кузнецова Е. А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Книга 2. Расшифровка дефектограмм. СПб.: Ультра Принт, 2014. 326 с.
16. Антипов А. Г., Марков А. А. Оценка глубины выявления поперечных трещин магнитодинамическим методом в дефектоскопии рельсов // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 57 – 68.
17. Марков А. А., Шпагин Д. А. Ультразвуковая дефектоскопия рельсов. СПб.: Образование-Культура, 2013. 284 с.
18. Марков А. А., Козьяков А. Б., Марков Ю. А. Неразрушающий контроль на рельсосварочных предприятиях. Развитие и перспективы // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 7. С. 2 – 8.
19. Марков А. А., Козьяков А. Б., Кузнецова Е. А. Расшифровка дефектограмм ультразвукового контроля рельсов. СПб.: Образование-Культура, 2006. 206 с.
20. Марков А. А., Антипов А. Г. Корреляционный анализ сигналов контроля сварных стыков магнитодинамическим методом // В мире НК. 2015. № 2. С. 74 – 77.
21. Пат. на изобр. № 2340495. Способ оценки дефекта в головке рельса / А. А. Марков, В. В. Мосягин, М. В. Кескинов. Опубл. 10.12.2008 // Бюл. 2008. № 34.
22. Мосягин В. В., Марков А. А. Обнаружение и оценка поперечных трещин под поверхностными расслоениями головки рельса // В мире НК. 2015. № 2. С. 68 – 73.

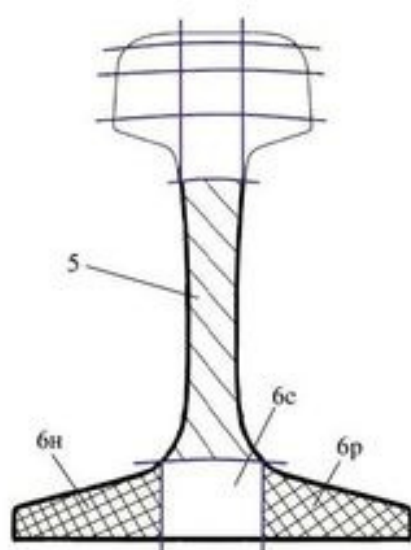
пути. Впервые для оценки состояния сварных стыков рельсов предложено анализировать уровни структурных шумов при УЗ-контроле [19] и изменение формы магнитного поля при МД-контроле [20] в зоне термического влияния стыка.

Опережая новые требования НТД по оценке размеров дефектов в головке рельсов, еще в 2011 г. был предложен и реализован принципиально новый дефектоскоп «АВИКОН-17», по сути представляющий собой ультразвуковой томограф [21]. Работоспособность и эффективность этого прибора доказана на многих действующих рельсовых путях [22]. Прибор позволяет не только оценить реальный размер трещины в головке рельса с требуемой для практики точностью, но и определять конфигурацию дефектов (задачи 4 и 5 данной статьи), создавая предпосылки к более дифференцированному подходу по срокам замены дефектных рельсов.

История развития диагностики рельсового пути за последние два десятилетия придает уверенность, что если за столь короткий исторический период удалось решить ряд принципиально новых и сложных технических проблем (комплексирование методов, регистрация сигналов сплошного контроля, измерение размеров дефектов), то и требования настоящего времени будут успешно удовлетворены в ближайшее время.

#### Библиографический список

1. Бирюзов В. П. Об основных направлениях развития систем диагностики и мониторинга путевого хозяйства до 2025 г. // *Путь и путевое хозяйство*. 2015. № 4. С. 4 – 8.
2. **Признаки дефектных и острodefектных рельсов:** НТДЦП-3-93. М.: Транспорт, 1993.
3. **Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefектных рельсов».** Утв. ОАО «РЖД» распоряжением № 2499 р от 23.10.2014. М., 2014. 140 с.
4. **Мазов Ю. Н., Сычев В. П.** Обоснование классификации и сроков замены острodefектных рельсов // *Путь и путевое хозяйство*. 2015. № 8. С. 2 – 6.
5. **Шур Е. А.** Повреждения рельсов. М.: Интекст, 2012. 192 с.
6. **Рейхарт В. А.** Анализ дефектов в рельсах // *Путь и путевое хозяйство*. 2011. № 4. С. 20 – 25.
7. **Иванов П. С., Зайцев Н. И., Кремнев Е. А., Гайворонский В. П.** Анализ дефектов рельсов // *Железнодорожный транспорт*. 2010. № 10. С. 58 – 60.
8. **Бели Я., Немет И.** Контактно-усталостные трещины головки рельса // *Путь и путевое хозяйство*. 2011. № 3. С. 33 – 37.
9. **Усталостные повреждения рельсов** // *Железные дороги мира*. 2011. № 6. С. 69 – 75.
10. **Пат. на изобр. № 2545493.** Способ ультразвукового обнаружения микротрещин на рабочей выкружке головки рельса / А. А. Марков, В. В. Мосягин, А. Ю. Веревкин. Опубл. 10.04.2015 // *Бюл.* 2015. № 10.
11. **Марков А. А.** Зарубежные системы контроля рельсов // *Путь и путевое хозяйство*. 2010. № 9. С. 32 – 40.
12. **Гурвич А. К., Довнар Б. П., Козлов В. Б. и др.** *Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте / под ред. А. К. Гурвича.* М.: Транспорт, 1983. 318 с.
13. **Марков А. А., Политай П. Г., Маховиков С. П. и др.** Комплексный анализ состояния рельсового пути с помощью нового вагона-дефектоскопа «АВИКОН-03» // *В мире неразрушающего контроля*. 2013. № 3. С. 74 – 79.
14. **Марков А. А., Кузнецова Е. А.** Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Книга 1. Основы. СПб.: КультИнформПресс, 2010. 290 с.
15. **Марков А. А., Кузнецова Е. А.** Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Книга 2. Расшифровка дефектограмм. СПб.: Ультра Принт, 2014. 326 с.
16. **Антипов А. Г., Марков А. А.** Оценка глубины выявления поперечных трещин магнитодинамическим методом в дефектоскопии рельсов // *Дефектоскопия*. 2014. № 8. С. 57 – 68.
17. **Марков А. А., Шпагин Д. А.** Ультразвуковая дефектоскопия рельсов. СПб.: Образование-Культура, 2013. 284 с.
18. **Марков А. А., Козьяков А. Б., Марков Ю. А.** *Неразрушающий контроль на рельсосварочных предприятиях. Развитие и перспективы* // *Путь и путевое хозяйство*. 2015. № 7. С. 2 – 8.
19. **Марков А. А., Козьяков А. Б., Кузнецова Е. А.** Расшифровка дефектограмм ультразвукового контроля рельсов. СПб.: Образование-Культура, 2006. 206 с.
20. **Марков А. А., Антипов А. Г.** Корреляционный анализ сигналов контроля сварных стыков магнитодинамическим методом // *В мире НК*. 2015. № 2. С. 74 – 77.
21. **Пат. на изобр. № 2340495.** Способ оценки дефекта в головке рельса / А. А. Марков, В. В. Мосягин, М. В. Кескинов. Опубл. 10.12.2008 // *Бюл.* 2008. № 34.
22. **Мосягин В. В., Марков А. А.** Обнаружение и оценка поперечных трещин под поверхностными расслоениями головки рельса // *В мире НК*. 2015. № 2. С. 68 – 73.



**Рис. 5. Зоны контроля сечения рельса:**

5 – зона шейки – зона неуверенного обнаружения поперечных трещин; 6а и 6б – зоны, не доступные для сплошного контроля

Очевидно, рассматриваемый подход зонирования контролируемого сечения по степени потенциальной дефектности и возможностей современных методов НК можно применить не только для головки, но и для всего сечения рельса (рис. 5).

Можно отметить, что в настоящее время все еще остаются проблемными зоны шейки (зона 5 на рис. 5) и перья подошвы рельса (зоны 6а и 6б). Действующей системой контроля в зоне шейки рельса весьма часто пропускаются поперечные трещины, не вызывающие отражение УЗ-сигналов при наклонном падении луча. Для обнаружения дефектов в перьях подошвы предложены методы и средства, приемлемые для контроля локальных участков (зон сварных стыков рельсов с помощью установки МИГ-УКСМ [17]), и отсутствуют решения для сплошного контроля.

#### **Решение актуальных задач НК рельсов**

По мере появления требований времени по разрушающему контролю рельсов, а иногда и опережая эти требования, в последнюю четверть прошлого века поэтапно решались весьма сложные и разные задачи по диагностике рельсов.

Учитывая, что выявляемость дефектов в первую очередь зависит от применяемых УЗ-схем прозвучивания, немало усилий было приложено к развитию разнообразных способов и схем обнаружения дефектов в сечении рельса. Патентованные для рельсовой дефектоскопии способы УЗ-контроля: зеркальный, РОМБ и РОМБ+, способ «2-эхо» – ста-

ли основными в схемах прозвучивания практически всех выпускаемых ОАО «Радиоавионика» дефектоскопов и комплексов [14, 15]. Именно благодаря этим техническим решениям удалось заметно (от 0,70 до 0,99) повысить вероятность обнаружения дефектов в головке (см. табл. 2 – зоны 1с, слои 2 и 3).

По мере разработки новых для своего времени микропроцессорных двухниточных дефектоскопов «АВИКОН-01МР», «АВИКОН-11» и «АВИКОН-14» [15], а также приборов и установок для контроля сварных стыков рельсов «МИГ-УКСМ» и «АВТОКОН-С» [18] предложены и реализованы новые для этой отрасли конструктивные решения: по центровке искательных систем; по конструкции дефектоскопной тележки; по обеспечению надежного акустического контакта как с помощью систем скольжения (УЗ-лыжи), так и путем ввода акустических колебаний через упругую оболочку колесного преобразователя (УЗ-колесо).

Попутно отметим, что установки для контроля сварных стыков типа «МИГ-УКСМ» и «АВТОКОН-С» являются единственными в мире, позволяющими за один-два прохода сканирующей системы полноценно озвучивать все сечение (включая перья подошвы) рельса как в пути, так и на рельсо-сварочных предприятиях.

Применение дефектоскопов типа «АВИКОН-14» с УЗ-колесными преобразователями [15] может существенно сократить протяженность так называемых контроленепригодных участков пути [3]. Это достигается за счет обеспечения стабильного ввода УЗ-колебаний как на участках с поверхностными неровностями, так и на изношенных рельсах за счет более плотного прилегания упругой оболочки УЗ-колеса к поверхности катания. В масштабе всей сети железных дорог такое нововведение может дать существенный экономический эффект.

Впервые в России (и в мире) объединили акустические и магнитные методы в одном дефектоскопическом комплексе «АВИКОН-03» вагона-дефектоскопа [15]. Убедившись в эффективности синергетического эффекта, комплекс впоследствии был дополнен визуальным (от 2 до 12 камер) и инерциальными методами контроля, реализуемыми с помощью четырех микромеханических измерительных модулей (акселерометров) [13]. Последние позволяют регистрировать весьма короткие неровности поверхностей катания рельсов, где наблюдается повышенное динамическое воздействие колес проходящих железнодорожных составов на рельсы. В результате, как следует из табл. 2, вероятность обнаружения дефектов в контролируемых ими зонах достигает максимального значения (0,99).

Развивались новые методические подходы по контролю наиболее сложных участков рельсового

Видно, что ни один из методов контроля не дает 100%-ной вероятности обнаружения дефектов. Поэтому вполне обоснованно для повышения надежности обнаружения дефектов комплексное применение методов, основанных на разных физических принципах.

Результаты расчета с учетом рассматриваемых методов приведены в табл. 2.

Анализ табл. 2 показывает, что отдельные зоны головки могут быть проверены разными физическими методами: это поверхностные и подповерхностные слои 1 и 2, где наряду с УЗ-методами эффективно используются магнитодинамический и визуальный методы контроля. Комплексирование методов дает заметный синергетический эффект и позволяет достичь высоких значений вероятности обнаружения дефектов.

В то же время нижняя часть головки (слой 4) проверяется только эхометодом УЗ-контроля при

прямом (без переотражений) вводе наклонного луча. Естественно, и вероятность обнаружения дефектов в рассматриваемой зоне ниже, чем в остальных слоях головки рельса. Острота проблемы снижается здесь за счет того, что и вероятность образования дефектов в данной зоне меньше. Центральная часть этого слоя (зона 4с) может быть проверена и зеркально-теневым, и дополнительно, кроме указанных на рис. 2, эхометодом контроля при озвучивании ПЭП 42° (45°) [14, 15].

Вероятности обнаружения дефектов, залегающих в разных зонах головки рельса, заметно отличаются. Самая низкая вероятность (0,7) – в зонах 4и и 4р в нижней части головки рельса, самые высокие, стремящиеся к предельному значению (выше 0,99), – именно в зонах зарождения и развития контактно усталостных трещин (слой 2 и зоны 3с и 3р).

2. Вероятность обнаружения дефектов в отдельных зонах головки рельсов комплексом методов НК

Зона головки рельсов	Методы контроля							Число методов (схем озвучивания)	Вероятность обнаружения
	Акустические					МД	Визуальный		
	Эхометод ( $\alpha = 58^\circ$ , $\gamma = 34^\circ$ )	ЗТМ ( $\alpha = 0^\circ$ )	Зеркальный ( $\alpha = 58^\circ$ , $\gamma = 34^\circ$ )	Эхометод ( $\alpha = 70^\circ$ )	Эхометод ( $\alpha = 45^\circ$ )				
1р	+	-	-	-	-	+	+	3	0,964
1с	+	+	-	+	-	+	+	5	0,997
1и	+	-	-	-	-	+	+	3	0,964
2р	+	-	+	-	-	+	+	4	0,997
2с	+	+	+	+	-	+	-	5	0,999
2и	+	-	+	-	-	+	-	3	0,994
3р	+	-	+	-	-	-	+	3	0,998
3с	-	+	+	+	-	-	-	3	0,994
3и	+	-	+	-	-	-	-	2	0,970
4р	+	-	-	-	-	-	-	1	0,700
4с	-	+	-	+	+	-	-	3	0,976
4и	+	-	-	-	-	-	-	1	0,700

$m$  – количество переотражений УЗ-колебаний внутри головки рельсов;  $m = 0$  – прямой луч;  $m = 1, 2$  – однократно, двукратно отраженный луч;  $\alpha$  – угол ввода ультразвуковых колебаний в металл рельса;  $\gamma$  – угол разворота преобразователя относительно продольной оси рельса.

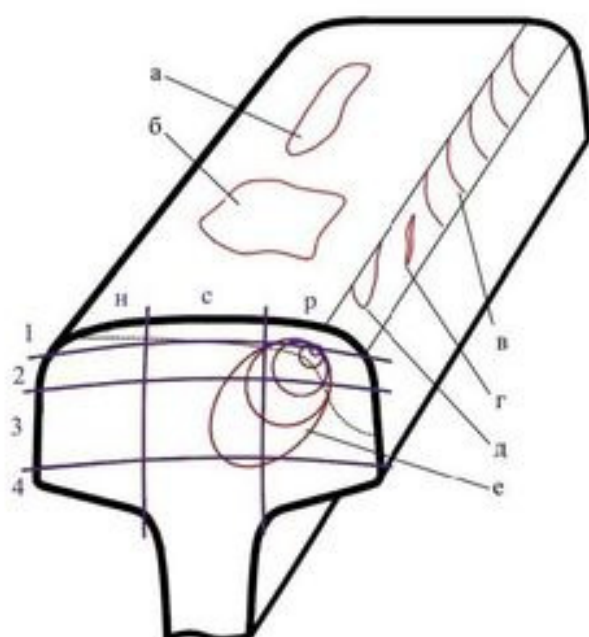


Рис. 4. Предлагаемая схема разделения сечения головки рельса на зоны:

а и б – поверхностные узкий и широкий дефекты кода 10; в – параллельные трещины (Head Checking); г и д – выкрашивание на рабочей выкружке (дефекты кода 11); е – поперечная трещина в головке (коды 20 – 22)

7) определение глубины развития параллельных трещин на рабочей выкружке и на поверхности катания головки рельса.

Для конкретизации задач НК с учетом природы возникновения и возможных способов их обнаружения предлагается разделить сечение головки рельса на 12 отдельных зон (рис. 4): 4 горизонтальных слоя и 3 вертикальных (рис. 4: *р* – со стороны рабочей грани; *с* – средняя часть; *н* – со стороны нерабочей грани). Глубина залегания слоя 1 выбрана до 8 мм, где, по действующим нормативным документам, поверхностные дефекты считаются допустимыми (с некоторыми ограничениями). Глубина залегания слоя 2 определяется зоной действия магнитодинамического метода контроля и в настоящее время может быть принята равной 15 мм [16]. Слои 3 практически распространяется до нижней выкружки головки рельса.

Несмотря на кажущуюся симметричность отдельных зон, необходимо отметить, что и симметричные зоны имеют свои особенности. Например, зоны 2р и 2н, а также 3р и 3н с точки зрения обнаружения дефектов известными способами кажутся полностью симметричными. Но в процессе эксплуатации зоны 2р и 3р со стороны рабочей грани в отличие от зон 2н и 3н нерабочей грани могут подвергаться значительному износу.

При использовании видеорегистрации, как правило, видеокамера преимущественно направлена на рабочую выкружку с внутренней грани головки рельса (при использовании одной камеры на нитку пути). Таким образом, рассматриваемые зоны 2р и 3р отличаются от симметричных (2н и 3н) как с точки зрения условий возникновения дефектов, так и с точки зрения их обнаруживаемости: могут иметь иную конфигурацию вследствие износа и дополнительно контролироваться визуальным способом.

В нижней части головки рельса находится 4-й слой, который характеризуется минимальным количеством обнаруживаемых дефектов в зонах 4р и 4н.

#### Вероятности обнаружения дефектов

С учетом применяемых методов контроля в качестве примера рассмотрим надежность обнаружения дефектов в отдельных зонах головки рельса.

Вероятности обнаружения дефектов комплексом из *n* систем в рассматриваемых зонах рассчитаны по известному выражению

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

где *P* – вероятность обнаружения дефекта комплексом методов; *P<sub>n</sub>* – вероятность обнаружения дефекта *n*-м методом.

Для расчета примем следующие начальные условия (табл. 1), полученные экспертным путем.

1. Вероятность обнаружения дефектов в головке рельсов отдельными методами контроля

№	Метод контроля зон головки рельса	Вероятность обнаружения дефекта данным методом <i>P</i>
1	УЗ-эхометод с ПЭП 58° (прямой луч: <i>m</i> = 0)	$P_{58, m=0} = 0,60$
2	УЗ-эхометод с ПЭП 58° (прямой и однократно отраженные лучи: <i>m</i> = 0 и <i>m</i> = 1)	$P_{58, m=0,1} = 0,70$
3	УЗ-эхометод с ПЭП 58° (одно- и двукратно отраженные лучи: <i>m</i> = 1 и <i>m</i> = 2)	$P_{58, m=1,2} = 0,80$
5	УЗ-эхометод с ПЭП 70° (прямой луч: <i>m</i> = 0)	$P_{70, m=0} = 0,85$
6	УЗ-зеркальный метод с ПЭП 58°	$P_{зрк} = 0,90$
7	Магнитодинамический метод	$P_{МД} = 0,70$
8	Визуальный метод (одна камера на нитку пути)	$P_{в(1)} = 0,60$

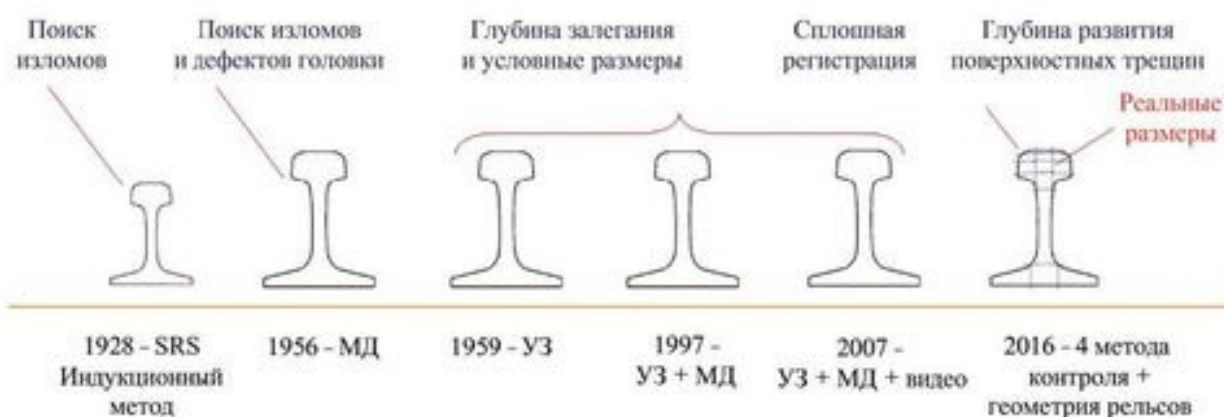


Рис. 2. Этапы развития дефектоскопии рельсов

Таким образом, на современном уровне развития рельсовой дефектоскопии появляется необходимость перехода от дефектоскопии к дефектометрии. Причем требования, предъявляемые к разным участкам рельсов как по сечению, так и по длине рельсового пути, разные.

#### Анализ сечения рельса по зонам

По данным ведущих специалистов [4 – 7] и анализа статистических данных, можно сделать вывод, что наибольшее количество отказов рельсов (до 70 %) происходит по поверхностным и внутренним дефектам головки рельсов. Поэтому в качестве примера рассмотрим специфику обнаружения дефектов в головке рельса.

На рис. 3 приведены наиболее эффективные методы контроля определенных зон головки. Схема прозвучивания состоит из схемы РОМБ+ и двух преобразователей с углами ввода 0° и 70°. Эти способы достаточно подробно описаны в работах [14, 15] и за многолетнюю эксплуатацию доказали свою эффективность.

Для контроля верхней части головки рельса дополнительно используется МД-метод и визуальный метод путем регистрации поверхности рельса одной видеокамерой, установленной над головкой рельса с внутренней стороны рельсовой колес. Эта схема (см. рис. 3) реализована практически во всех мобильных средствах дефектоскопии с аппаратурой «АВИКОН-03(М)» и успешно работает на сети дорог уже более 10 лет [13].

Из рис. 3 видно, что для обеспечения безопасности движения поездов и своевременного обнаружения всевозможных дефектов в головке рельсов мобилизован дос-

таточно мощный комплекс методов НК, эффективность применения каждого из которых зависит от решаемых задач и контролируемых зон головки рельсов.

При контроле определенной части рельса (головки рельса) в процессе дефектоскопии могут решаться следующие задачи:

- 1) обнаружение локальных внутренних дефектов на участках рельсового пути без видимых повреждений поверхности катания;
- 2) обнаружение поверхностных повреждений;
- 3) классификация поверхностных повреждений (короткие, узкие и широкие по [3]);
- 4) определение ориентации дефекта в головке рельса (поперечная, продольная горизонтальная или вертикальная);
- 5) определение размеров внутренних поперечных трещин (меньше или больше критического размера);
- 6) обнаружение поперечных трещин под горизонтальными расслоениями и повреждениями поверхности катания;

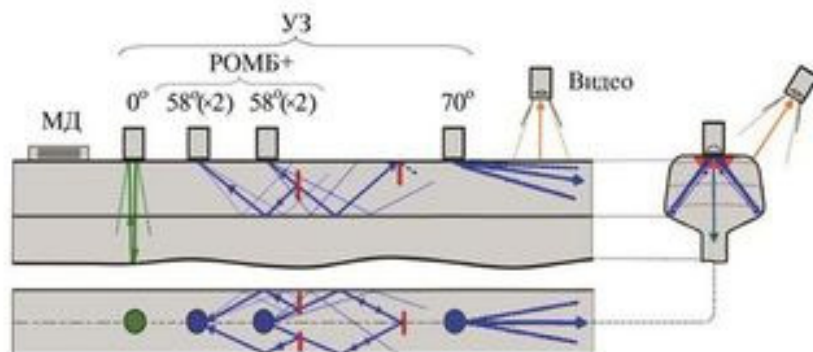


Рис. 3. Методы неразрушающего контроля головки рельса: магнито-динамический (МД), акустические (зеркально-теневой метод (ЗТМ), эхо-, РОМБ+, эхо-70°) и визуальный («отъезжающие» УЗ-каналы не показаны)



Рис. 1. Характерные дефекты в рельсах:

*a* – поперечная трещина (код 21.2); *b* – комбинированный дефект – продольное расслоение (код 30) и поперечная трещина (21.2); *в* – поверхностные параллельные трещины (Head Checking)

В зависимости от размеров в плане их дифференцируют на короткие, узкие и широкие, и при превышении их глубины больше определенной величины (от 1 до 8 мм) ограничивают скорости движения поездов (от 120 до 25 км/ч) [3].

Согласно статистическим данным, на сети дорог эксплуатируется свыше 67 тыс. рельсов с поверхностными повреждениями. Они подлежат плановой замене, но по мере эксплуатации рельсового пути появляются вновь.

Периодический сплошной ультразвуковой контроль таких участков существенно затруднен тем, что поверхностные повреждения частично или полностью препятствуют вводу ультразвуковых колебаний вглубь рельса с поверхности катания. В то же время именно под ними, как правило, зарождаются опасные поперечные трещины в головке, способные привести к хрупкому излому рельса [3 – 7].

По мере развития высокоскоростного движения определенной проблемой становятся и параллельные поверхностные трещины (зарубежная терминология Head Checking [8]), возникающие в основном из-за повышенного воздействия колес локомотивов [5] на рабочую выкружку головки рельса.

Путем периодического шлифования головки рельсов удается предотвратить дальнейшее развитие этих трещин и переход их в опасные поперечные трещины. Но при этом необходимо весьма точно знать глубину распространения параллельных трещин. На европейских железных дорогах этот параметр (до 3 мм) удается определять косвенным способом только вихретоковым методом [8, 9]. В России эта задача пока не очень актуальна, но с развитием высокоскоростного движения, так же как на европейских дорогах, может за короткий срок стать весьма востребованной. Работы в этом направлении уже начаты [10].

### Основные этапы развития рельсовой дефектоскопии

Анализируя развитие рельсовой дефектоскопии в историческом плане, можно выделить три крупных этапа.

**На первом этапе** в процессе контроля достаточно было найти любой локальный дефект в рельсе, представляющий непосредственную угрозу движению поездов. На железных дорогах США для этих целей использовали индукционный метод контроля, позволяющий путем пропускания через контролируемый участок рельса электрического тока значительной величины наблюдать за отклонением электромагнитного поля над дефектом [11]. В России исторически первым методом сплошного контроля рельсов являлся магнитный (магнитодинамический) метод контроля [12, 13] (рис. 2). Около 100 магнитных вагонов-дефектоскопов обеспечивали выявление дефектов больше критического размера на скоростях до 70 км/ч на всей сети железных дорог МПС СССР.

**На втором этапе** по мере роста возможностей дефектоскопии росли и требования по оценке дефекта. Необходимо было оценивать условные размеры и глубину залегания дефектов в определенных зонах сечения рельса: в головке, в шейке или подошве рельса. Для этого созданы многочисленные УЗ-съемные и портативные дефектоскопы.

**На третьем этапе** (в настоящее время), как следует из изложенного, все чаще требуется оценивать не только условные [12], но и реальные размеры дефектов, например, при организации шлифовки головки нужно оценить глубину распространения поверхностных трещин с весьма высокой точностью (до долей миллиметров). При переходе к мониторингу состояния рельсов необходимо будет знать размеры внутренних поперечных трещин с точностью до нескольких миллиметров.



новременно акустические и магнитодинамические методы неразрушающего контроля (НК). 15 лет назад многие еще сомневались в возможности регистрации сигналов сплошного контроля рельсов в съемных дефектоскопах. Регистрация сигналов контроля каждого миллиметра пути по 10...22 УЗ-каналам и представление их в интуитивно понятном для оператора виде на автономных дефектоскопах действительно являлась непростой научно-технической задачей.

В настоящее время все эти задачи решены, и на сети дорог ОАО «РЖД» действует стройная система НК рельсов. В результате количество изломов рельсов под поездами из-за дефектов в рельсах за последнюю четверть века сократилось почти в 10 раз.

С помощью современных 190 мобильных (автоматрисы и вагоны-дефектоскопы), 3260 съемных и 800 переносных дефектоскопов ежегодно обнаруживаются и своевременно изымаются из пути 36...42 тыс. опасных дефектов (ОДР) [1]. Несмотря на весьма сложные условия эксплуатации (на значительной части полигона железнодорожных линий годовые изменения температуры от  $-55$  до  $+55$  °С) и высокую грузонапряженность (в среднем 34 млн т/км груза в год) число допущенных внезапных изломов рельсов в год из-за дефектов за последние 5 лет не превышает 60. Это свидетельствует о высоком техническом и организационном уровне системы неразрушающего контроля на российских железных дорогах.

Вопреки достигнутым успехам изломы рельсов в пути из-за дефектов все же происходят, что требует дальнейшего развития методов и средств НК рельсов.

#### Новые требования к системе НК

По мере развития системы НК рельсов меняются и требования к решаемым задачам. Необходимо не только своевременно предотвращать возможные изломы, но и совершенствовать методологию диагностики рельсов для решения новых вызовов времени.

Например, до недавнего времени отсутствовали какие-либо требования по критическим размерам дефектов в головке рельсов. Любой дефект в виде поперечной или продольной трещины (на глубине более 8 мм) в головке рельсов, формирующий в ожидаемой временной зоне эхосигнал с амплитудой выше заданного порога, считался опасным и «подлежал немедленному изъятию из пути (замене)» [2].

В новой классификации дефектов рельсов [3] впервые указан критический размер поперечной

трещины в головке рельса, при котором может произойти излом всего рельса: «14...16 мм по высоте или 25...30 % площади поперечного сечения головки при температуре выше  $-20$  °С и от 15 % при температуре ниже  $-20$  °С». Это создает предпосылки в последующем перейти от аварийного изъятия рельсов из эксплуатации при появлении сигналов от предполагаемых дефектов к мониторингу состояния рельсов.

Очевидно, что плановое изъятие рельса из пути при приближении площади развивающегося дефекта к критическим размерам менее затратно, чем немедленное изъятие *остродефектных рельсов* (ОДР). Но для реализации этой перспективы, обещающей немалый технико-экономический эффект, необходимо не только продолжать совершенствовать нормативно-техническую документацию, но и иметь технологию и средства, позволяющие определять типы и размеры (высоту или площадь) обнаруживаемых дефектов в рельсах.

Как показывает практика, количество ОДР по дефекту в виде продольных горизонтальных трещин в головке (код дефекта 30.1-2)<sup>1</sup> рельсов почти в 1,5 раза выше, чем по всем остальным дефектам [4]. В то же время, например, на участках пути Московской дирекции инфраструктуры за последние 17 лет не было ни одного излома рельса из-за горизонтальных продольных трещин. В основном изломы происходят из-за поперечных трещин головки (код 20-22.1-2) или их сочетания (поперечная трещина под продольным расслоением). В связи с этим весьма важно в процессе дефектоскопии определять не только факт наличия, но и ориентацию дефекта (продольный, поперечный или их сочетание) и на основе этих данных определять очередность работ по восстановлению бездефектного пути.

В последние десятилетия наряду с уменьшением выхода рельсов по ряду внутренних дефектов значительно (до 50 %) увеличилось относительное количество рельсов, снимаемых с пути вследствие образования выкрашиваний на поверхности [5]. Поэтому в поверхностном слое головки рельсов, кроме обнаружения внутренних локальных дефектов, требуется выявлять и выкрашивания металла на поверхности катания. В основном это рельсы с пробуксовками, отслоениями и выкрашиваниями металла на поверхности катания, вызванные как недостатками технологии изготовления, так и воздействием подвижного состава. Эти повреждения (рис. 1), как правило, не представляют непосредственную угрозу безопасности движения поездов и их, согласно нормативно-технической документации, относят к дефектным.

<sup>1</sup> Здесь и далее коды дефектов в рельсах указаны по [3].