

**ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
(ОСЖД)**

I издание

Разработано экспертами Комиссии ОСЖД
по инфраструктуре и подвижному составу
14-16 мая 2019 г., Литовская Республика, г. Вильнюс

Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД
по инфраструктуре и подвижному составу
5-7 ноября 2019 г., Комитет ОСЖД, г. Варшава

Дата вступления в силу: 7 ноября 2019 г.

P 742

**ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ
МИКРОТРЕЩИН. СПОСОБЫ ИХ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОЦЕНКА
ИХ РАЗВИТИЯ**

Содержание

1	Введение.....	3
2	Микротрещины типа Head Checking	3
	2.1 Возникновение трещин от усталостных повреждений, вызванных контактом качения колеса по рельсу.....	5
	2.2 Основные условия возникновения микротрещин	5
	2.3 Влияние воды и смазки на развитие дефектов типа Head Checking.....	6
	2.4 Этапы роста микротрещин	6
3	Разновидности усталостных дефектов, вызванных контактом качения колеса по рельсу	7
	3.1 Микротрещины Head Checking	7
	3.2 Смятие (Squats)	7
	3.3 Гнездо трещин (Belgrospi).....	8
	3.4 Образования «языка».....	8
	3.5 Вмятина	8
	3.6 Волнообразный износ на внутренней нити кривой	9
	3.7 Волнообразный износ от вибрации	9
	3.8 Места юза колеса	10
4	Методы контроля, применяемые для выявления микротрещин Head Checking	10
	4.1 Визуальное наблюдение	10
	4.1.1 Контроль поверхностных дефектов видеосистемой	10
	4.2 Магнитный метод контроля	10
	4.3 Испытание на проникновение жидкости (Пенетрационный контроль).....	11
	4.4 Магнитоиндуктивный или вихретоковой контроль.....	12
	4.4.1 Применение вихретокового метода для контроля рельсов	13
	4.4.2 Вихретоковые устройства контроля.....	13
	4.5 Специальный метод ультразвукового контроля	16
	4.5.1 Отображение трещин головки рельса при ультразвуковом контроле...	18
5	Оценка микротрещин	19
	5.1 Выводы возможного визуального осмотра	20
	5.2 Оценка результатов вихретокового контроля	21
	5.3 Классы дефектов по вихретоковому методу	22
	5.4 Оценка результатов по вихретоковому методу.....	22

1 Введение

Усталостные повреждения, дефекты рельсов, вызванные контактом качения колеса по рельсу (*Rolling Contact Fatigue = RCF*), за последнее время интенсивно появились на *сети* железных дорог. Ещё несколько лет назад практически ни одного дефекта в виде микротрещин (английское название „HEAD CHECKING”) на выкружке головки рельса не наблюдалось. На сегодняшний день специалистам необходимо не только изучать понятие микротрещин, но оно станет частью их ежедневной работы.

Под усталостными повреждениями, вызванными контактом качения колеса по рельсу, т.е. микротрещинами на головке рельсов подразумеваются такие трещины, которые возникают сдвигом металла в подповерхностных зонах головки рельса под влиянием больших сдвигающих усилий, передаваемых колесами.

2 Микротрещины типа Head Checking

Микротрещины типа Head Checking могут возникать в рельсах любого типа, но характерно появляются в большей части в **кривых** участках с большим недостаточным возвышением и в стрелочных переводах **без подуклонки**.

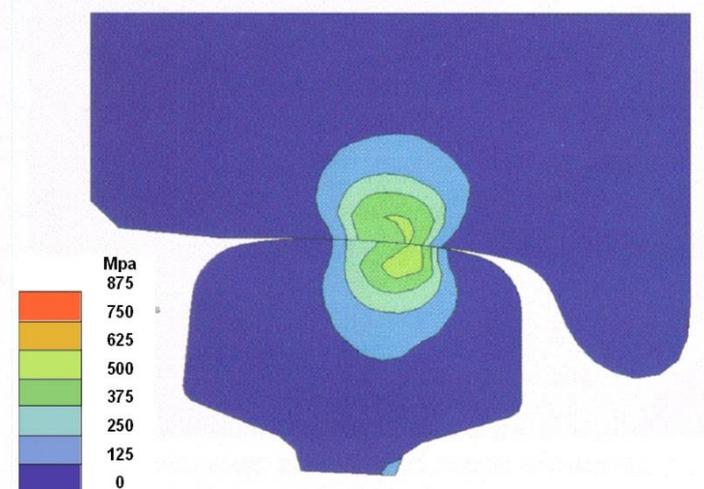


Рис. 1. Напряжения, возникающие при **одноточечном** контакте колеса и рельса

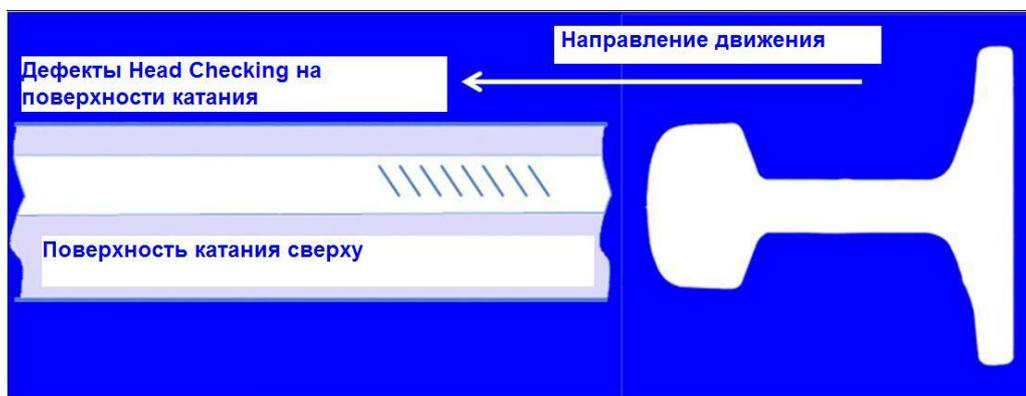


Рис. 2. Возникновение микротрещин типа Head Checking при одноточечном контакте колеса и рельса

С уменьшением радиуса кривой точка контакта, то есть место возникновения микротрещин перемещается в сторону рабочей грани рельса (рис.3.)

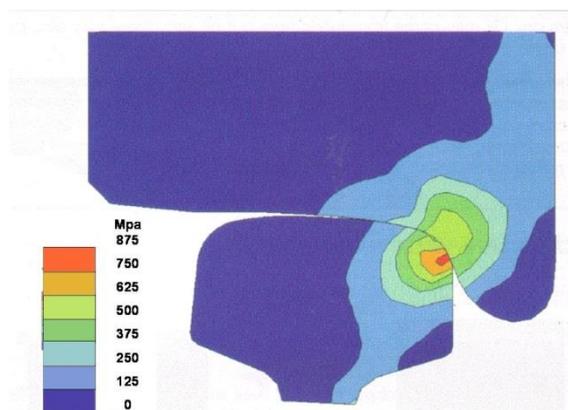


Рис. 3. Распределение напряжения при одноточечном контакте колеса и рельса при движении в кривых участках

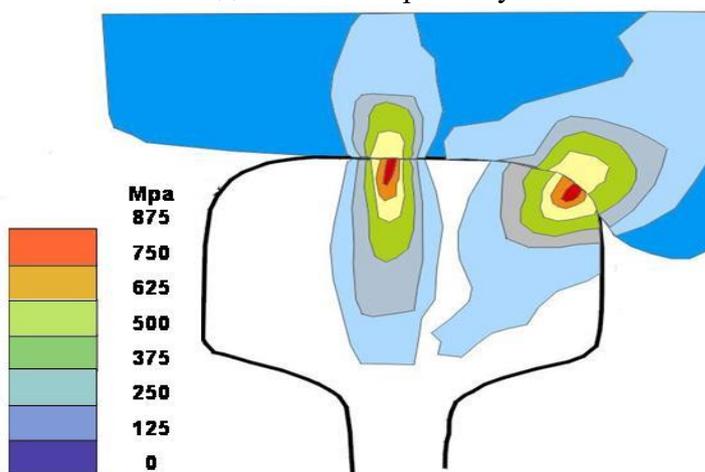


Рис. 3а. Распределение напряжения при двухточечном контакте колеса и рельса при движении в кривых участках (осевая нагрузка 225 кН)

Микротрещины типа Head Checking могут возникать как на новых рельсах, эксплуатируемых меньше одного года, так и на очень старых. Наблюдалось также, что на рельсах, эксплуатируемых 30 лет, на которых раньше не выявили микротрещин, сейчас они появляются.

Микротрещины могут выступать одиночно, но более характерно их распространение на длинном участке пути, например, в кривой, с недостаточным возвышением. Трещиноватость появляется как в виде тонких, замкнутых, малых, параллельно и близко расположенных друг к другу трещин, расстояние между ними составляет 2-3 мм (рис. 4), а более длинные размещаются друг от друга на большем расстоянии (10-20 мм).



Рис. 4. Плотное расположение дефектов Head Checking

2.1 Возникновение трещин от усталостных повреждений, вызванных контактом качения колеса по рельсу

Контакт колеса и рельса со временем вызывает усталость металла, возникновение трещин в подповерхностном пространстве (перераспределение на поверхности, контактную и термическую усталость).

2.2 Основные условия возникновения микротрещин

Возникновение дефектов Head Checking за последнее время изучали достаточно глубоко и были многократно опубликованы результаты исследований. В общем случае трещины от усталостных повреждений, вызванных контактом качения колеса по рельсу, возникают из-за чрезмерного воздействия колеса на рельс. Силы трения в контакте колесо-рельс (в продольном и поперечном направлении) на поверхности вызывают сжатие и растяжение кристаллической решётки металла. Микротрещины головки рельса возникают и развиваются, прежде всего, на тех участках пути, где характерно выражено основное направление движения (двухпутные линии), или на однопутных линиях, где сильно выражено влияние тяги (крутые подъемы, участки разгона торможения подвижного состава).

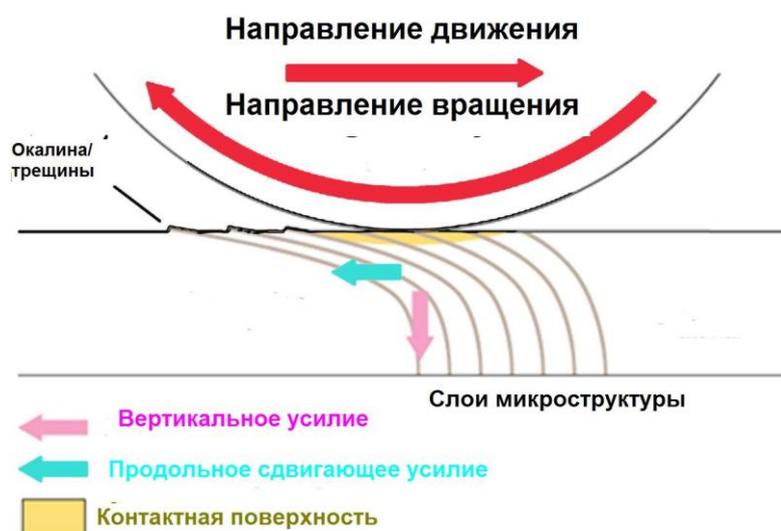


Рис. 5. Поведение колеса и рельса на участках разгона при курсировании современных локомотивов, вызывающих повышенные сдвигающие усилия

Высокие контактные напряжения между колесом и рельсом способствуют возникновению микротрещин, и главной причиной в развитии микротрещин типа Head Checking считается сдвиг между контактными поверхностями колеса и рельса (рис. 5). Также часто наблюдается возникновение микротрещин типа Head Checking на линиях с преобладанием грузового движения и с большой грузонапряженностью, при курсировании современных локомотивов с большой осевой нагрузкой.

Современные локомотивы и тяговые единицы с большой тяговой мощностью развивают большие сдвигающие усилия и можно утверждать, что микротрещины на сети железных дорог появились за последнее время вследствие появления современных локомотивов.

Со стороны инфраструктуры возникает вопрос, что можно предпринять со стороны подвижного состава для уменьшения или ограничения продольных

сдвигающих сил. Этот вопрос необходимо решать путейцам и механикам сообща и выполнить комплексный анализ для оптимизации контакта колеса и рельса.

2.3 Влияние воды и смазки на развитие дефектов типа Head Checking

Лабораторные исследования показали, что контактные усталостные дефекты возникают чаще в сухих с большим трением условиях, а росту трещин сопутствует присутствие жидкости (вода, масло). В пути вода появляется из осадков и может остаться в трещинах головки рельса, если даже поверхность рельса кажется сухой. Масло попадает на рельс из лубрикаторов или из двигателей локомотивов.

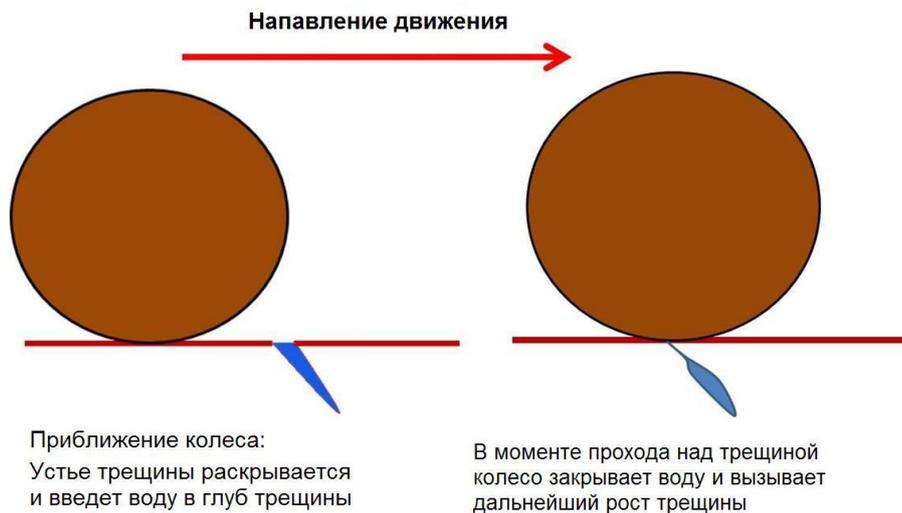


Рис. 6. Влияние жидкости на рост дефектов типа Head Checking

Если вследствие высоких контактных напряжений сдвига уже появились микротрещины, присутствие жидкости при проезде поездов будет вызывать их рост. Закрытая в трещинах жидкость вызывает очень высокое местное сжимающее напряжение.

2.4 Этапы роста микротрещин

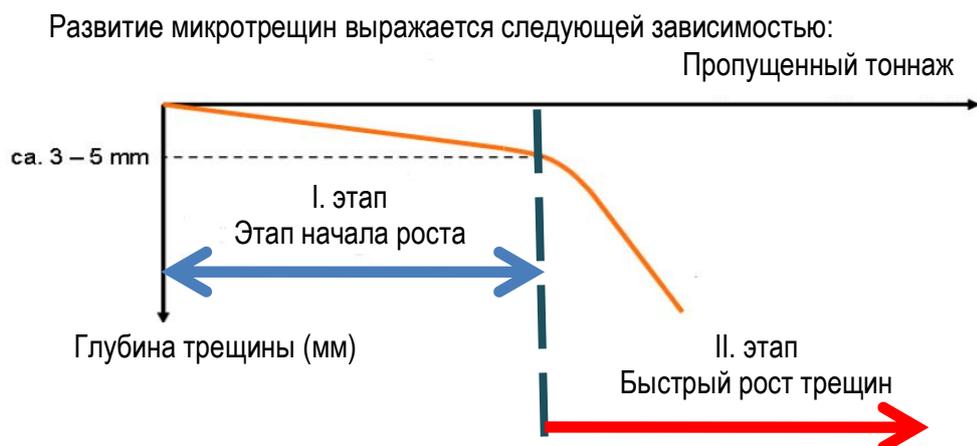


Рис. 7. Этапы развития микротрещин Head Checking

Развитие дефектов Head Checking можно разделить на два этапа в зависимости от пропущенного тоннажа. Первый это этап начала роста

микротрещины, здесь глубина трещины развивается прямо пропорционально с ростом её длины и очень важно, что длина дефекта не превышает 20 мм.

На втором этапе глубина трещины быстро растёт и угрожает безопасности движения. Темп развития микротрещины непредсказуем, в любой момент **может происходить излом рельса**.

Развитие глубины трещин Head Checking в зависимости от качества рельса на основании исследований показано на следующем рисунке:

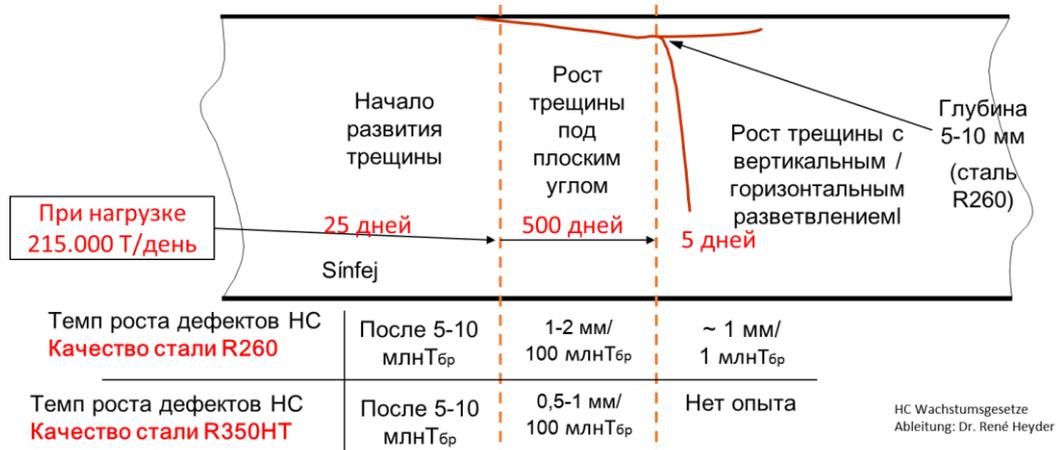


Рис. 7.а. Этапы развития микротрещин Head Checking на основании исследований

3 Разновидности усталостных дефектов, вызванных контактом качения колеса по рельсу

Эти повреждения возникают в процессе эксплуатации. С появлением современных тяговых единиц большой мощности резко возросло возникновение повреждений, вызванных контактом качения колеса по рельсу.

3.1 Микротрещины Head Checking

Усталостная микротрещина появляется, прежде всего, на наружной нити кривых участков пути, вызвана большими динамическими нагрузками в контакте колеса и рельса.

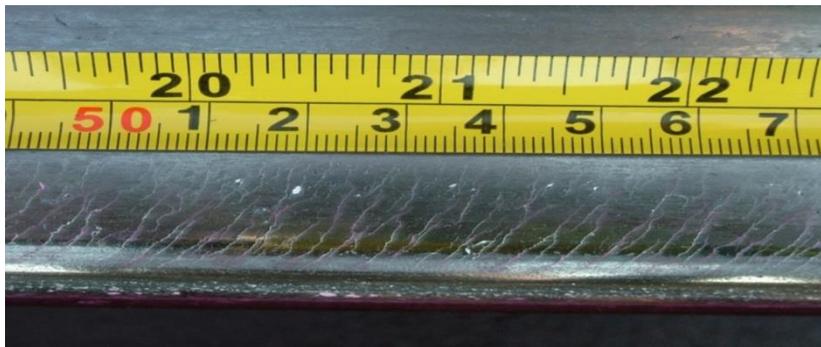


Рис. 8.

3.2 Смятие (Squats)

Одиночные трещины пологим углом под поверхностью катания в виде «V» (стороны «V» открываются в направлении боковой поверхности), со временем смятия становятся темного цвета.



Рис. 9.

3.3 Гнездо трещин (Belgrospi)

Гнездо трещин, возникающее в седловинах волнообразного износа из-за усталости, стали являются неотъемлемой частью волнообразного износа.



Рис. 10

3.4 Образования «языка»

Образования языка часто выступают на кривых участках, где в точках контакта гребня колеса возникают поверхностные трещины, потом под влиянием гребня колеса образуются так называемые «языки», исходящие от трещин.

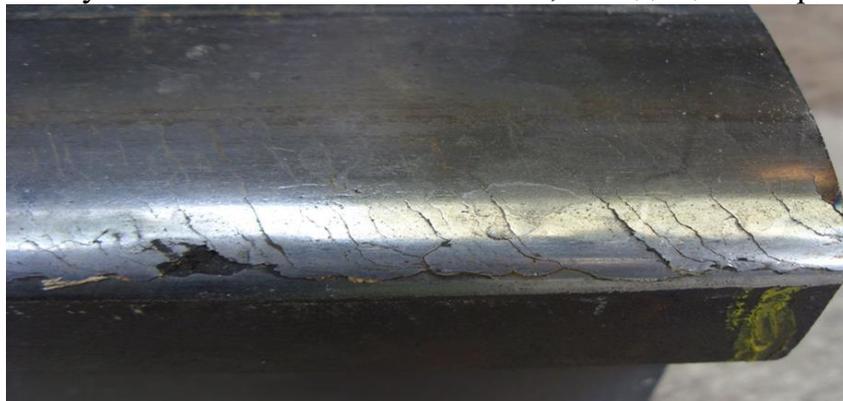


Рис. 11.

3.5 Вмятина

Одиночный дефект, возникающий вследствие попадания твердого предмета между колесом и рельсом.



Рис. 12

3.6 Волнообразный износ на внутренней нити кривой

Волнистость, возникающая вследствие износа от проскальзывания на внутренней рельсовой нити.



Рис. 13

3.7 Волнообразный износ от вибрации

Волнистость, возникающая на прямых участках и в кривых большого радиуса на обеих рельсовых нитях из-за изменения структуры металла вследствие вибрации в контакте колеса/рельса.



Рис. 14

3.8 Места юза колеса

Возникает на участках разгона/торможения из-за буксования колеса, в виде наклёпа металла, седловины и т.д.



Рис. 15

4 Методы контроля, применяемые для выявления микротрещин Head Checking

Из-за опасности микротрещин Head Checking их выявление является очень важным процессом. Для этой цели могут служить несколько методов контроля.

Методы контроля, применяемые для выявления поверхностных дефектов:

- визуальное наблюдение,
- магнитный метод контроля,
- пенетрационный контроль,
- вихретоковой контроль
- специальная процедура ультразвукового контроля

4.1 Визуальное наблюдение

При помощи этого метода можно выявить трещины, выходящие на поверхность рельса. Для обнаружения трещин применяется лупа и измерительная линейка. При этом поверхность надо подготовить, обеспечив очистку и хорошую освещенность поверхности.

Это самый простой метод для повседневного применения, с его помощью можно установить длину микротрещин Head Checking и этап их развития.

4.1.1 Контроль поверхностных дефектов видеосистемой

Быстрый технический прогресс в области визуализации позволил регистрировать дефекты поверхности рельсов с помощью видеокамер высокого разрешения. В результате расшифровки видео изображений получаем дефекты поверхности рельса. С помощью этой системы можно обнаружить только дефекты Head Checking, однако дефекты Head Checking в начальной стадии их развития также не могут быть обнаружены видео системой.

4.2 Магнитный метод контроля

Магнитный (магнитодинамический - МД) метод исследования состояния рельсов, уложенных в железнодорожный путь, основан на воздействии движущимися источниками постоянного магнитного поля (намагничивающей

системой) на рельсы и выявлении структурных аномалий внутри рельса по искажениям картины поля вблизи него.

Устройство магнитной дефектоскопии рельсов содержит электромагнитные катушки, установленные на осях колесных пар и возбуждающие постоянный магнитный поток на участках рельса, расположенных между пятнами контакта колесных пар с рельсом, и датчики аномалий магнитного поля, установленные на указанных участках рельсов.

Преимущества МД метода:

- МД метод хорошо позволяет выявлять поверхностные дефекты, тем самым обеспечивает своевременную локализацию рельсов, где рабочая выкружка головки повреждена микротрещинами (Head Checking).
- возможность обнаружения внутренних поперечных трещин на фоне поверхностных микротрещин.

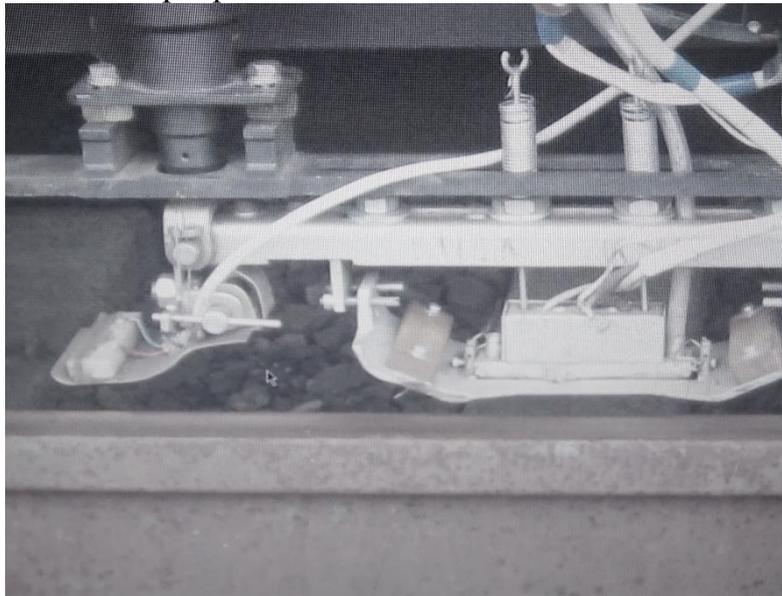


Рис. 16. Магнитный датчик

4.3 Испытание на проникновение жидкости (Пенетрационный контроль)

Очень чувствительный метод для выявления поверхностных дефектов, неоднородностей рельса, выступающих на его наружную поверхность. Шаги контроля приведены на рис. 17.

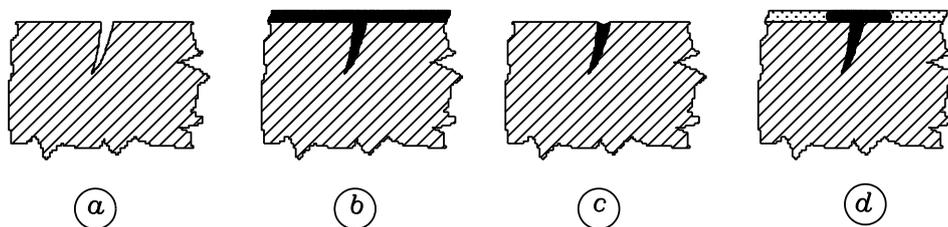


Рис. 17. Процесс пенетрационного контроля:

- а) Подготовка, чистка поверхности, б) Нанесение пенетрационной жидкости на контролируемую поверхность, в) Удаление лишней жидкости, г) Проявление, оценка

Пенетрационный метод очень наглядно выявляет микротрещины Head Checking (рис. 18).



Рис. 18. Результат пенетрационного контроля микротрещин на поверхности рельса

4.4 Магнитоиндуктивный или вихретоковой контроль

Метод основан на регистрации изменений электрических параметров вихретокового датчика дефектоскопа, вызванных взаимодействием поля вихревых токов, возбуждённых этим датчиком в контролируемом изделии из электропроводящего материала, с полем самого датчика. Результирующее поле содержит информацию об изменении электропроводности и магнитной проницаемости из-за наличия в металле структурных неоднородностей или нарушений сплошности изделия.

Принципиальная схема метода:

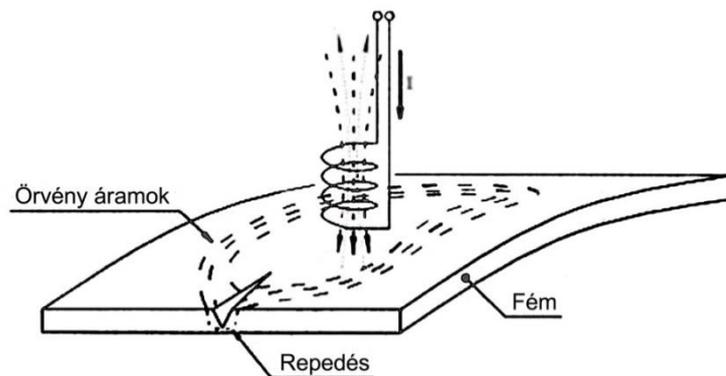


Рис. 17. Вихретоковый контроль

Этот метод контроля широко применялся в диагностической системе железных дорог для выявления поверхностных дефектов рельсов. Вихретоковый контроль необходимо немедленно ввести в систему диагностики, потому что глубину микротрещин в начальной стадии их развития только этим методом можно с большой уверенностью определить.

Знание начальной стадии рельсов важно с точки зрения сокращения расходов по содержанию при помощи устранения неглубоких микротрещин шлифованием.

4.4.1 Применение вихретокового метода для контроля рельсов

Позиция зондов на поверхности катания, на выкружке и на рабочей грани устанавливается независимо друг от друга. Позиция зондов устанавливает квалифицированный оператор в зависимости от вида повреждения.

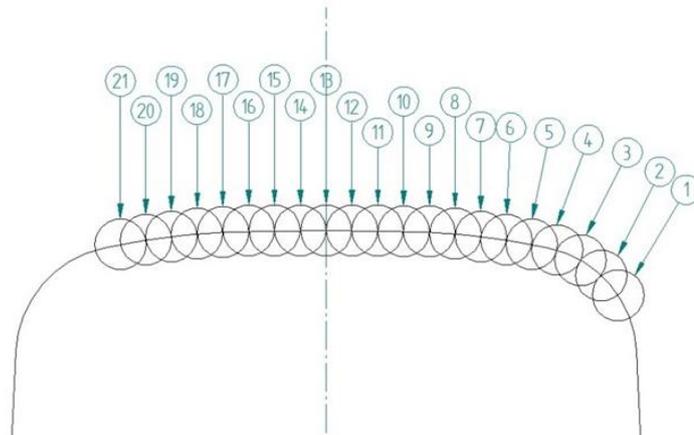


Рис. 18. Позиция зондов и их полосы контроля

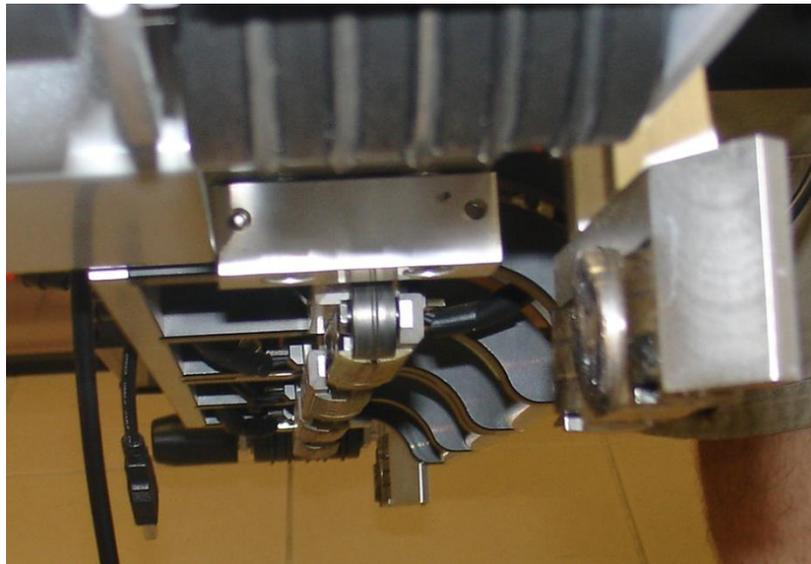


Рис. 19. Вихретоковые зонды

4.4.2 Вихретоковые устройства контроля

4.4.2.1 Ручные приборы

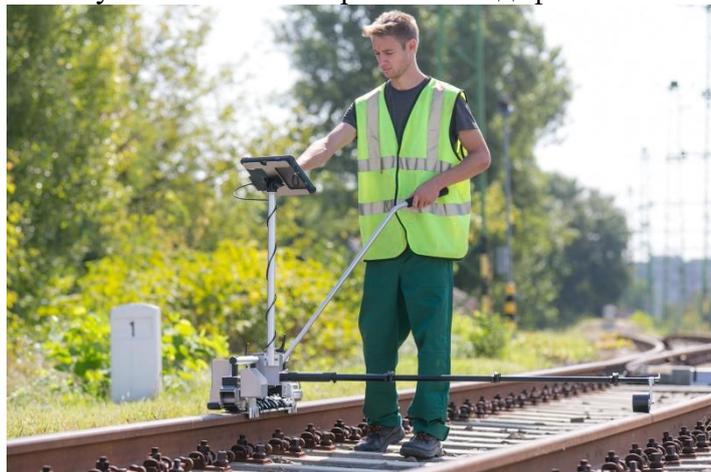
- **HCScan** – Ручное вихретоковое устройство для обнаружения усталостных поверхностных дефектов:



- **HCSscan Dual** – 2 канальное ручное вихретоковое устройство для обнаружения усталостных поверхностных дефектов:



- **GF04** – 4 канальное ручное вихретоковое устройство для обнаружения усталостных поверхностных дефектов:



- **GF08** – 8 канальное ручное вихретоковое устройство для обнаружения усталостных поверхностных дефектов

4.4.2.2 Мобильная вихретоковая система контроля

Появление в большом объеме усталостных трещин типа HeadChecking требовало, чтобы вместо съёмных диагностических средств применялись мобильные системы контроля большой производительности. Совместно с

ультразвуковой системой контроля на диагностический вагон монтируется вихретоковая система контроля.

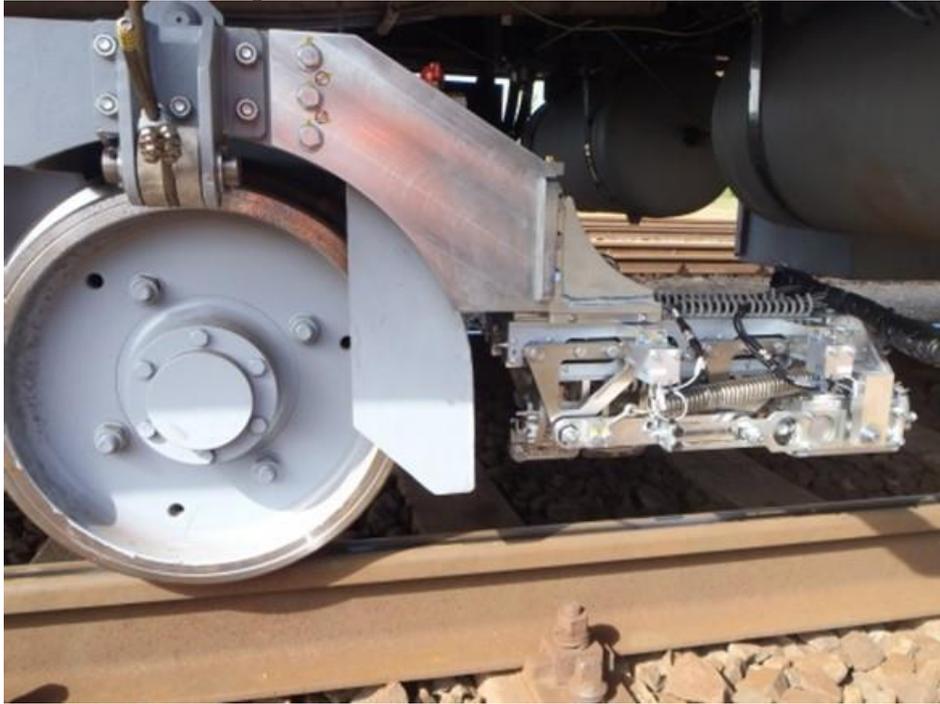


Рис. 20. Мобильное вихретоковое оборудование на измерительной тележке

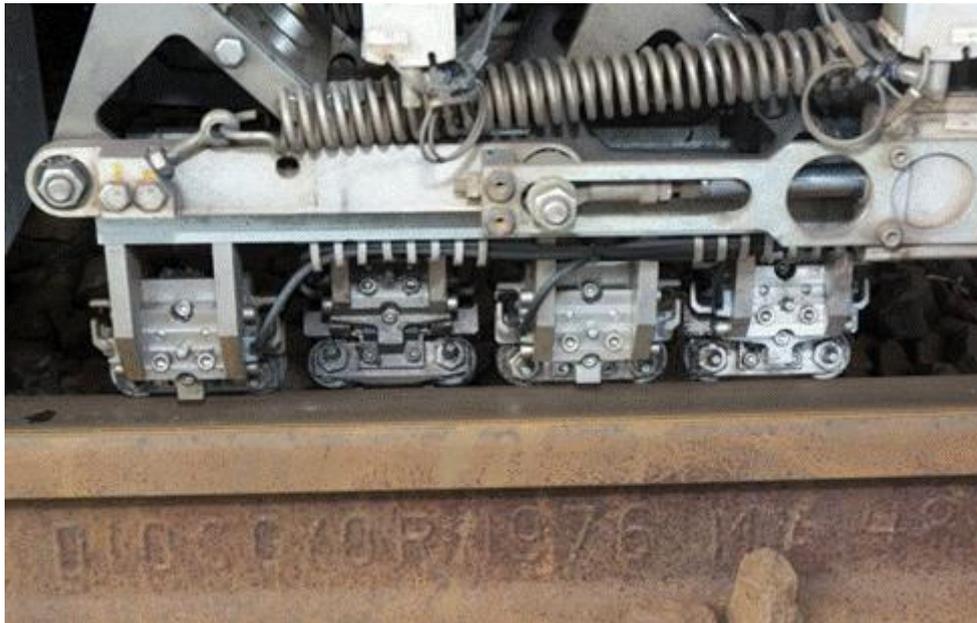


Рис. 21. Вихретоковые преобразователи

Основные технические параметры мобильной вихревой системы контроля:

Преобразователи: 4 преобразователя на каждую рельсовую нить

Диапазон измерения: 0.01 – 3.00 мм

Частота: 150 кГц

Представленные результаты:

Глубина повреждения

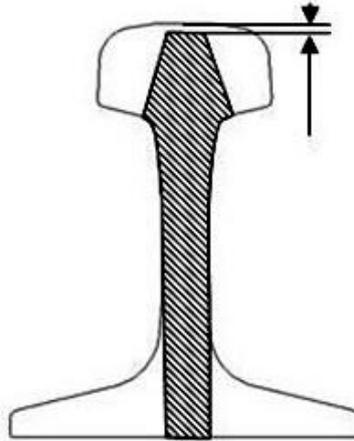
Номер трещины

Измерительная скорость: 70 км/ч

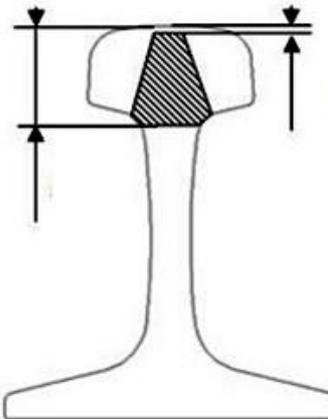
4.5 Специальный метод ультразвукового контроля

Обычные методы ультразвукового контроля не пригодны для выявления усталостных дефектов рельса, появляющихся на поверхности головки рельса. Для выявления этих дефектов рельсов большей глубины железные дороги применяют ультразвуковой контроль с УЗ-головкой, перемещенной к рабочей грани рельса. Эти дополнительные испытания были включены в технологию испытаний вихревым током. С помощью обычных ультразвуковых головок в рельсе можно обнаружить следующие области сечения рельса:

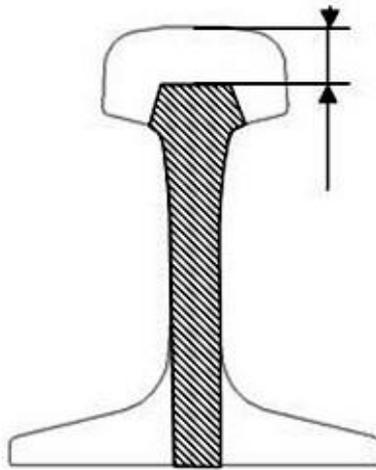
- с УЗ головкой „0°” обнаруживаются следующие области сечения рельса:



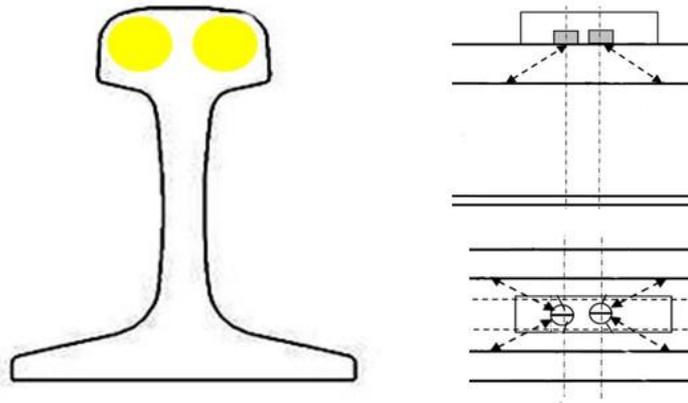
- с УЗ головкой „70° ” обнаруживаются следующие области сечения рельса:



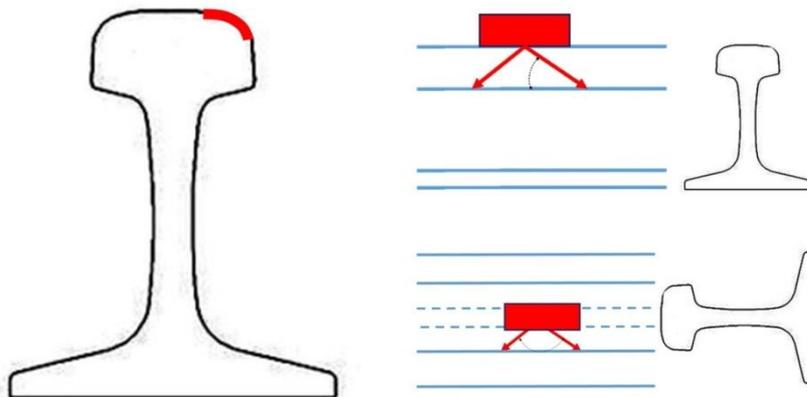
- с УЗ головкой „45° ” обнаруживаются следующие области сечения рельса:



- с УЗ головкой „58°” обнаруживаются следующие области сечения рельса (рабочая и нерабочая грань):



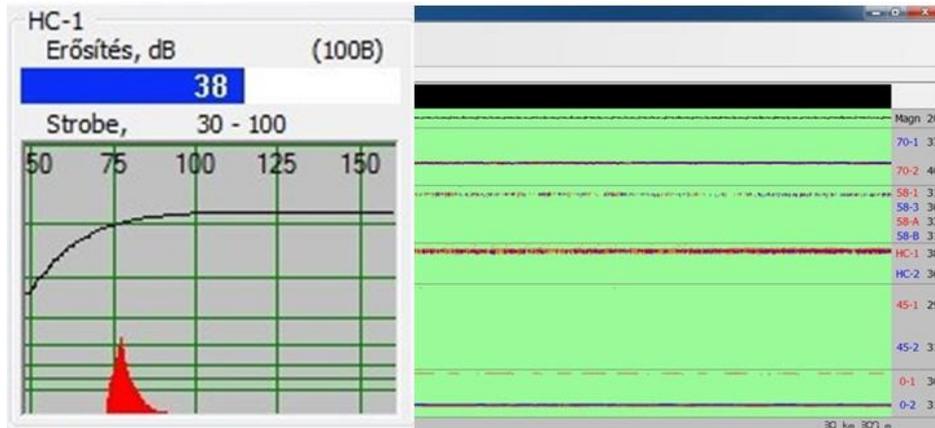
- УЗ головка „50°” для выявления дефектов Head-Checking



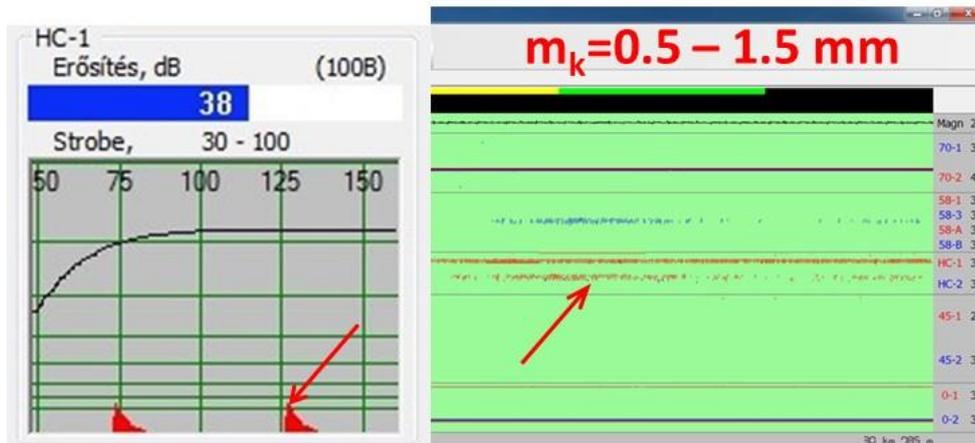
4.5.1 Отображение трещин головки рельса при ультразвуковом контроле

Полученные при контролях развертки «А» и развертки «В» для дефектов с разной глубиной залегания:

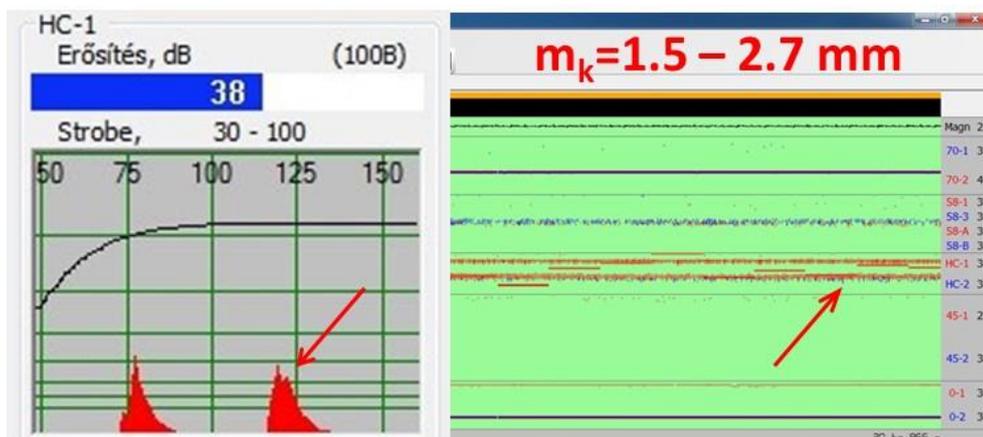
- Отсутствует дефект НС на головке рельса:



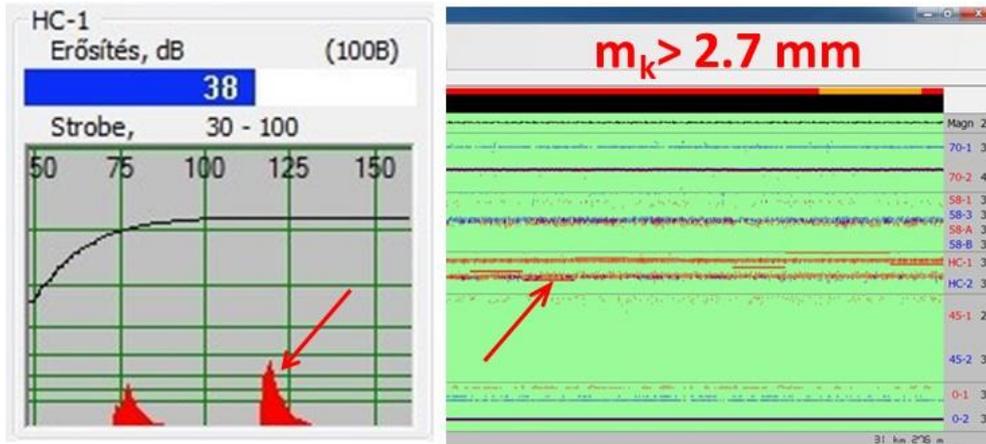
- Величина дефекта НС от 0,5 до 1,5 мм:



- Величина дефекта НС от 1,5 до 2,7 мм:



– Величина дефекта НС больше, чем 2,7 мм:



5 Оценка микротрещин

Длина микротрещины – то, что видим невооруженным глазом – это линия прореза поверхности катания и рабочей грани. Плоскость трещины от микротрещины на поверхности заходит во внутрь головки рельса. При помощи вихретокового дефектоскопа измеряется длина трещины под поверхностью. Следующий рисунок показывает линию направления трещины.

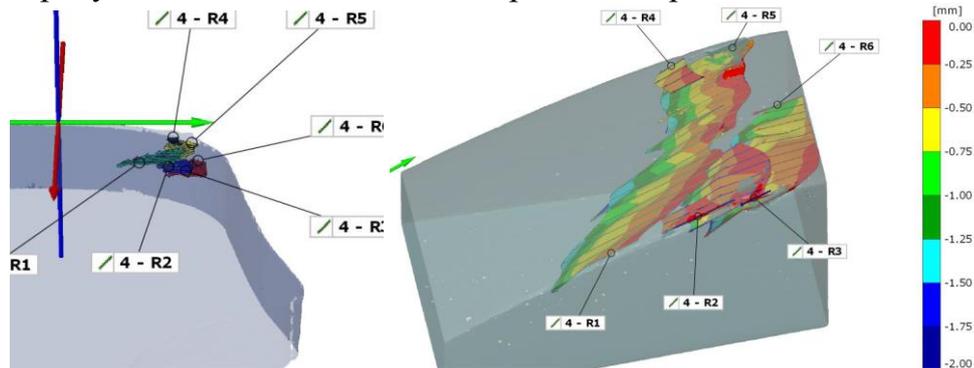
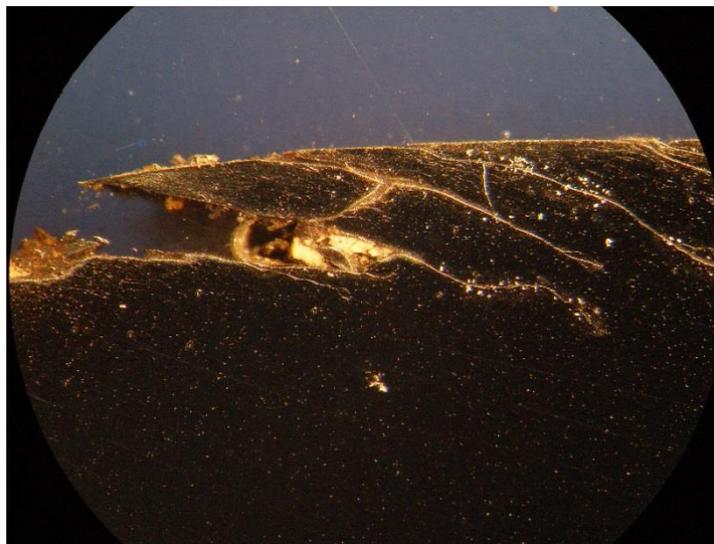


Рис. 20 Пространственное распространение трещин в зоне выкружки головки рельса



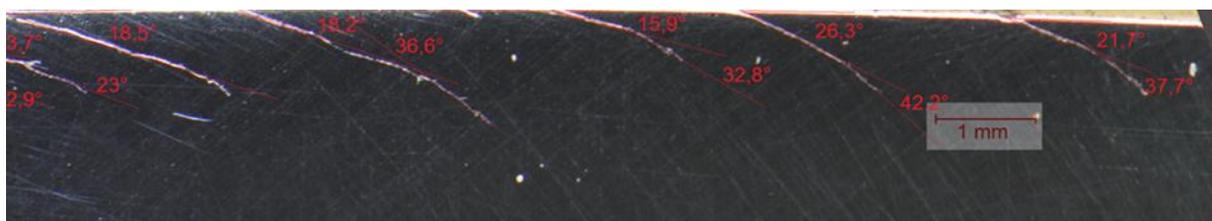


Рис. 21 Микроскопическая съемка микротрещин НС (прорез)

Линия трещины определенно не прямая, а ломанная линия, как видно на съемке. Трещины развиваются под поверхностью катания пол малым углом, потом достигая глубину 3 – 5 мм развиваются дальше, в глубь головки под крутым углом. Это явление может привести к излому по полному поперечному сечению рельса. Согласно технической литературе, малый угол под поверхностью составляет 13 – 15 градусов, а крутой угол принимает значение 50 – 60 градусов.

5.1 Выводы возможного визуального осмотра

Это самый простой метод контроля для повседневного пользования. При этом методе можно определить длину трещин Head Cheking.

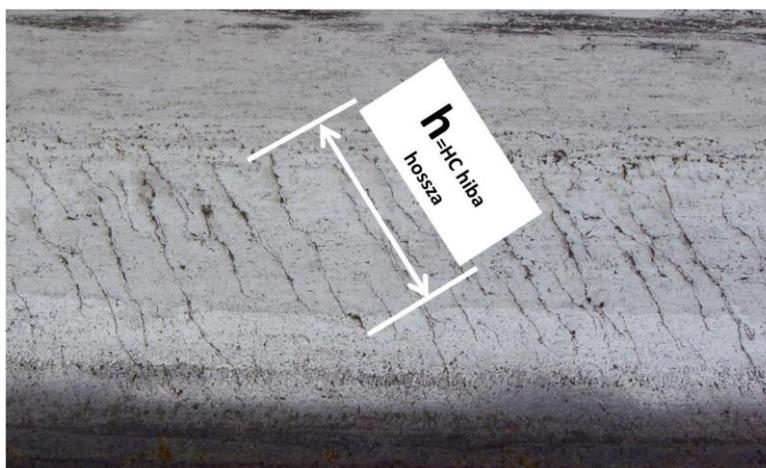


Рис. 22 Длина трещин Head-Checking на головке рельса

Для выполнения теста требуется соответствующий опыт.

Оценка результатов визуального теста:

Длина трещины	Классификация
Меньше 10 мм	Малый
10-19 мм	Умеренный
20-29 мм	Тяжелый
От 30 мм	Опасный

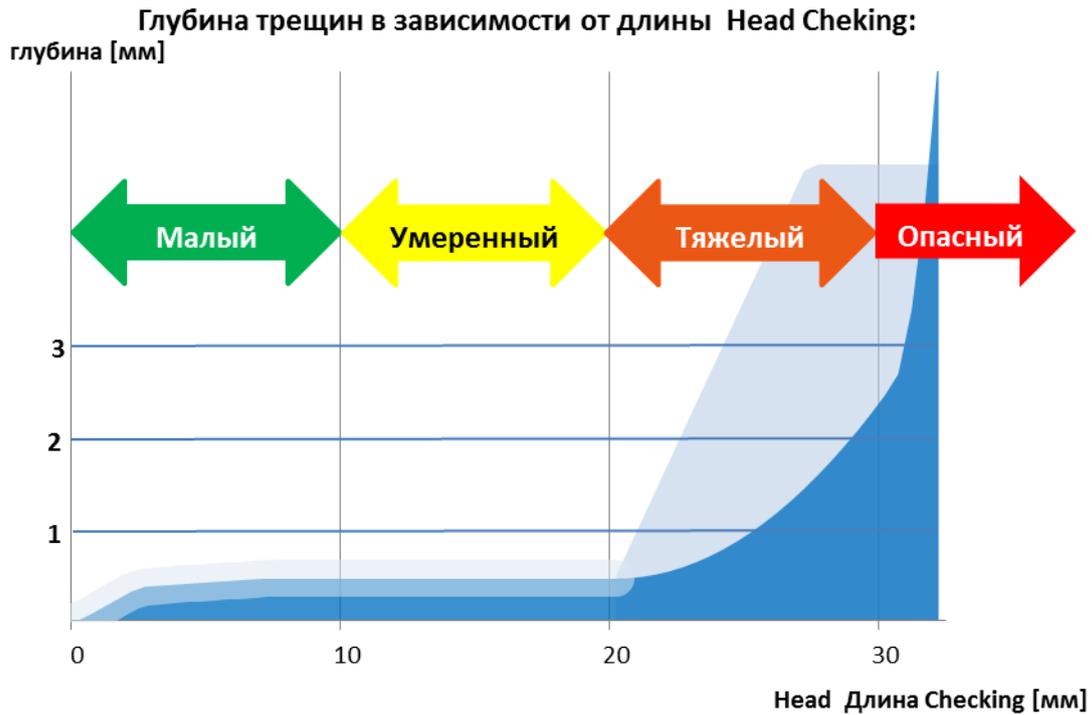


Рис. 23

5.2 Оценка результатов вихретокового контроля

Вихретоковым методом может быть измерена длина трещины, а точнее сечение плоскости трещины, попадающее в линию измерения зонда. Так как не знаем точно, что в момент измерения распространение трещины находится ещё в фазе малого угла, или уже перешла в фазу большего угла, поэтому на основании измеренной длины трещины и условного угла направления получаем не фактическую глубину трещины, а вычисляем так называемую **глубину повреждения**. Этот условный угол составляет 25 градусов в международной практике.

На следующем рисунке показано продольное сечение рельса, который иллюстрирует принцип расчета глубины повреждения:

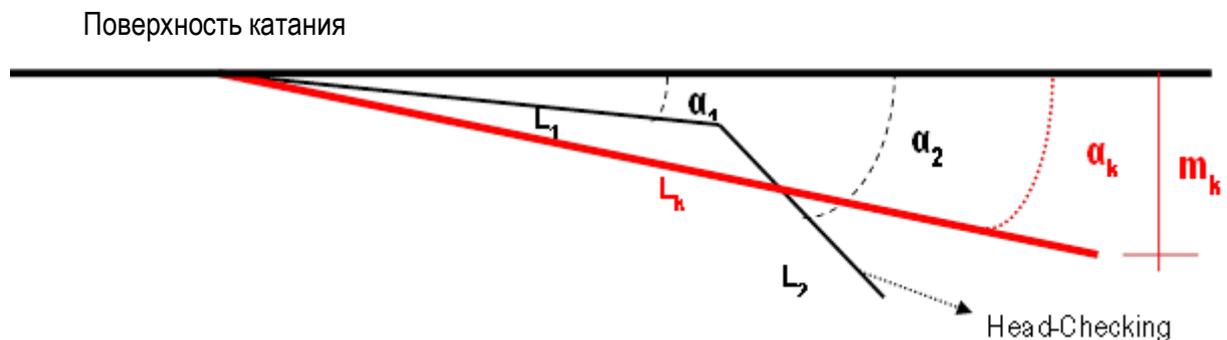


Рис. 24 Вычисление глубины повреждения

Из рисунка вытекает, что на основании фактической длины трещины ($L_1 + L_2$), угла α_k можно вычислить глубину повреждения:

$$m_k = L_k * \sin \alpha_k$$

Где:

L_1 : длина трещины в первой фазе

m_1 : глубина трещины в первой фазе

α_1 : угол распространения трещины в первой фазе

L_2 : длина трещины во второй фазе

m_2 : глубина трещины во второй фазе

α_2 : угол распространения трещины во второй фазе

L_k : результат вихретокового измерения

m_k : глубина повреждения

α_k : угол для подсчета глубины повреждения

На основании рисунка 12 можно сделать следующие выводы:

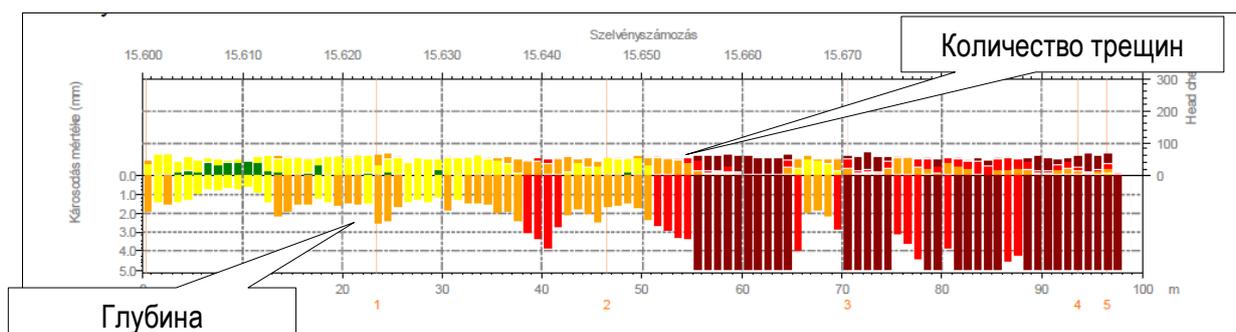
- На первом этапе трещины, и в начале второго этапа фактическая глубина трещины вероятно меньше, чем расчетная глубина повреждения,
- на втором этапе трещины ниже красной линии фактическая глубина трещины вероятно больше, чем расчетная глубина повреждения.
- Точка пересечения красной и черной линии - также является на основе международной практики – находится на 2,7 мм под поверхностью катания головки рельса.

5.3 Классы дефектов по вихретоковому методу

Класс дефекта	Глубина повреждения (m_k) [мм]	
Класс 5.	$m_k < 0,5$	
Класс 4.	$0,5 \leq m_k < 1,5$	
Класс 3.	$1,5 \leq m_k \leq 2,7$	
Класс 2.	$m_k > 2,7$	УЗ контроль
Класс 1.	Имеется УЗ-сигнал	

5.4 Оценка результатов по вихретоковому методу

Толкование графика вихретоковых измерений:



Цветовая шкала дефектов Head-Checking:

$0 < 0,5 \text{ мм}$	
$0,5 < 1,5 \text{ мм}$	
$1,5 < 2,7 \text{ мм}$	
$2,7 < 5 \text{ мм}$	
$> 5 \text{ мм}$	