

Раннее обнаружение усталостных трещин в рельсах

Неразрушающий магнитный контроль, осуществляемый индукционным методом (вихретоковый метод), дает возможность обнаруживать места возникновения усталостных трещин на ранней стадии их зарождения.

Безопасность и экономичность перевозок являются основой концепции рационального технического обслуживания железных дорог. Для учета постоянно растущих требований необходимы достоверные и систематизированные сведения о состоянии пути. Такие сведения обычно получают с помощью метода неразрушающего контроля. Проводимые на их основании мероприятия по техническому обслуживанию сводятся к целому комплексу предупредительных работ вплоть до комплектной замены рельсов. В последние десятилетия развитие техники железнодорожного транспорта все в большей степени обеспечивает сокращение времени нахождения пассажиров и грузов в пути. Происходящие изменения ведут к росту нагрузок на путь, вследствие чего ими преимущественно и определяются повреждения рельсов. В связи с этим необходимо совершенствовать существующие методы контроля, а там, где их возможности исчерпаны, искать новые.

Повреждения, обусловленные качением колеса по рельсу

При большой осевой нагрузке и/или высокой скорости между катящимся колесом и рельсом возникают значительные контактные напряжения. В наибольшей степени это относится к наружному рельсу в кривых радиусом 500 – 5000 м.

Здесь происходит значительное набежание гребня бандажа на рабочую поверхность головки рельса (рис. 1).

Площадь контакта составляет всего несколько квадратных миллиметров; на ней действуют экстремальные переменные силы, вызывающие постоянные пластические

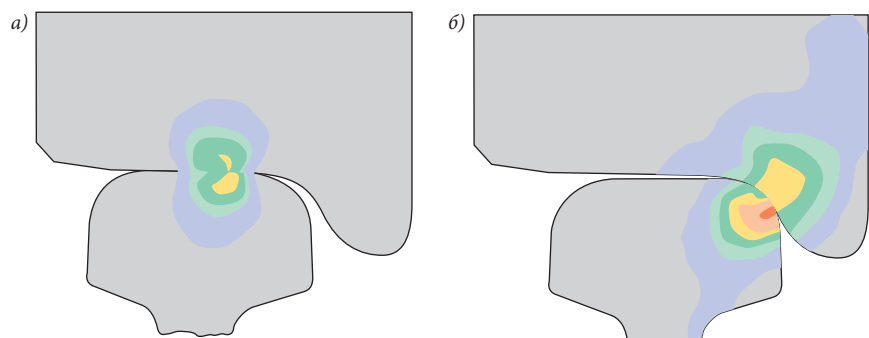


Рис. 1. Зоны контактной нагрузки в колесе и рельсе при их взаимодействии: а – на прямолинейном участке пути; б – на наружном рельсе в кривой

деформации микроструктуры. Этот эффект дополнительно усиливается возникающим боксованием. В сложившейся ситуации прежде всего происходит упрочнение поверхностного слоя – наклеп. При этом твердость в направлении к поверхности рельса заметно возрастает.

С течением времени повторяющиеся деформационные процессы приводят к значительным изменениям структуры материала и появлению в кристаллической решетке дислокаций относительно высокой плотности. В дальнейшем в поверх-

ностном слое рельса появляется сеть тонких трещин. Этот процесс известен как усталость при контакте качения (Rolling Contact Fatigue, RCF), а трещины, возникающие на рабочей грани головки рельса (рис. 2), получили название усталостных трещин (Head Checks). Продолжающиеся процессы качения ускоряют их рост. Усилить эффект может влага, попадающая в трещины.

Обычно такая трещина развивается под углом около 25° к поверхности катания рельса, при этом фактический рост в общем нельзя оценить только по ее длине, видимой на поверхности. Кроме того, трещины на определенной стадии развития способны изменять свое направление в плоскости сечения рельса. В конечном итоге усталостные трещины могут стать причиной излома рельса. В случае хрупкого излома в одном месте вели-

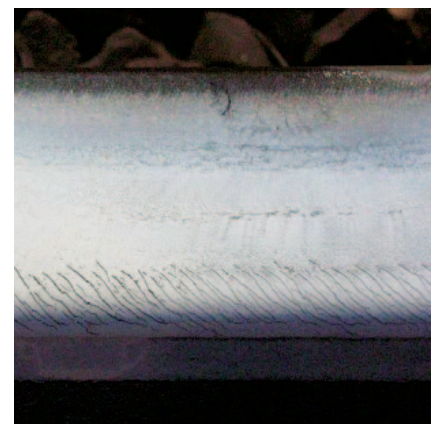


Рис. 2. Усталостные трещины на рабочей грани головки рельса

ка опасность того, что в непосредственной близости произойдет по той же причине еще один излом. В результате сход подвижного состава с рельсов будет неизбежен.

Наряду с усталостными трещинами возникают и другие повреждения, обусловленные усталостью материала вследствие контакта качения. Однозначно классифицировать такие повреждения не всегда возможно, так как некоторые из них имеют признаки, характерные для других видов дефектов. Кроме того, повреждение одного вида иногда может вытекать из другого.

Обнаружение повреждений неразрушающими методами контроля

Проведение контроля железнодорожных рельсов требует значительных затрат. Как правило, применяются только такие методы, которые позволяют выполнять измерения в движении. В этом случае необходимое оборудование располагают в специальном дефектоскопическом поезде. Проверенные в эксплуатации в течение десятилетий ультразвуковые устройства эффективны при обнаружении усталостных повреждений только тогда, когда трещины уже начали расти. В результате выявляется состояние,

при котором требуется замена рельса. Однако, как уже отмечалось, усталостные повреждения, обусловленные движением поездов, начинаются всегда на поверхности катания рельса.

Рациональная и экономичная стратегия технического обслуживания пути должна быть нацелена на обнаружение повреждения в его начальной стадии, когда зарождающийся дефект еще можно устранить механической обработкой, например шлифованием, фрезерованием или строганием.

Для надежного обнаружения рассматриваемых усталостных повреждений уже несколько лет успешно применяют вихретоковый метод неразрушающего контроля, реализуемый во многих европейских странах и используемый в измерительных и шлифовальных поездах. Дефектоскопический поезд, использующий ультразвуковой метод, дооборудуют установкой для вихретоковой дефектоскопии. Обычно это восьмиканальная система (по четыре канала на рельс), с помощью которой можно проводить измерения при движении поезда со скоростью до 70 – 100 км/ч (рис. 3).

Применяют также вихретоковый прибор WPG, установленный на тележке, перемещаемой по

рельсам вручную (рис. 4). Обычно его используют для дефектоскопии рельсов на небольших участках, а также в зоне стрелочных переводов. Применяется он также и для уточнения показаний, полученных при проходе дефектоскопического поезда, поскольку при более низкой скорости перемещения прибора обеспечивается повышенная точность локализации дефекта.

С помощью электромагнитной индукции контроль осуществляется бесконтактным способом. Соединяющая среда, например вода, не требуется. Но при этом она не является препятствием, если одновременно выполняется и ультразвуковой контроль. Метод обладает высокой чувствительностью, легко может быть автоматизирован и пригоден для испытаний, выполняемых в движении с большой скоростью, как этого требуют правила эксплуатации испытательных поездов. Необходимая для получения магнитного поля энергия крайне незначительна. Возбуждаемый в рельсе ток измеряется микроамперами. Нарушений работы устройств управления и обеспечения безопасности движения, как это наблюдалось при работе вихретокового тормоза, в данном случае ожидать не приходится.

В качестве датчика используется головка с системой катушек (рис. 5),

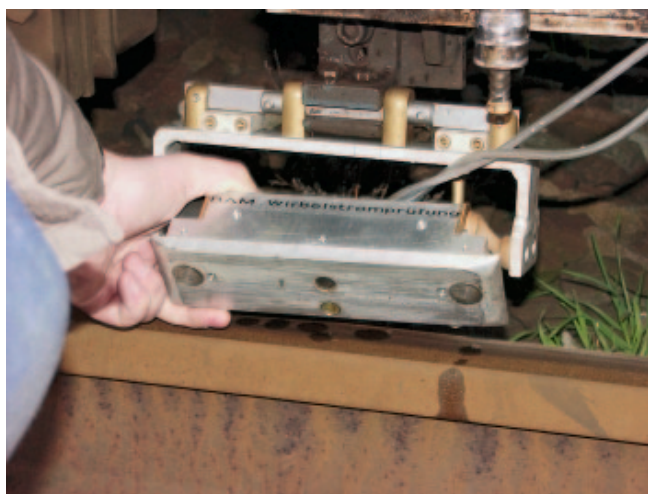


Рис. 3. Вихретоковая дефектоскопическая головка, устанавливаемая на поезде



Рис. 4. Прибор WPG для испытаний вихретоковым методом, перемещаемый вручную

на которые воздействует переменный ток. Возникающее в катушках переменное магнитное поле благодаря магнитной индукции образует в испытуемом объекте круговые вихревые токи. Эти токи со своей стороны создают вторичное магнитное поле, которое накладывается на первичное поле датчика и в конечном итоге служит в качестве измеряемой величины.

Неоднородности, имеющие в испытуемом объекте, изменяют картину линий вторичного магнитного поля и тем самым позволяют обнаруживать дефект. Такими неоднородностями могут быть разрывы материала (трещины), а также зоны, в которых изменяются свойства материала. Последнее особенно важно в связи с изложенными ранее соображениями о возникновении усталости материала при контакте качения. Так как возбуждаемое переменное магнитное поле датчика взаимодействует с диполями атомной решетки металла, а свободные носители зарядов решетки участвуют в передаче тока, датчик чутко реагирует на изменения структуры.

Кроме того, имеют определенное влияние и механические внутренние напряжения, так как они препятствуют изменениям направления спонтанного намагничивания, которое возникает при движении границ между доменами (так называемых стенок Блòха).

Вихретоковый метод контроля хорошо отражает изменение твердости рельса. На рис. 6, а показано

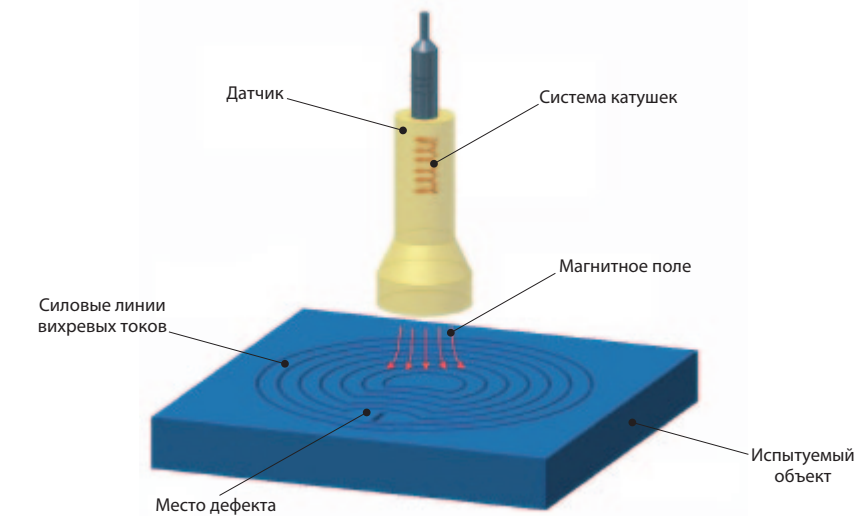


Рис. 5. Принцип вихретоковой дефектоскопии

изменение в продольном направлении твердости шва, полученного термитной сваркой. Измерения выполнены в лаборатории на отрезке рельса из стандартной стали R 260, для образования шва применен метод сварки SoW-5. Из рисунка видно, что в зоне термического влияния твердость несколько снижается, а в переходной зоне повышается примерно до НВ 320. На рис. 6, б представлено изменение амплитуды измеренного напряжения при вихретоковом контроле случайно выбранного шва, произведенном испытательным поездом, движущимся со скоростью 50 км/ч. Швы, результаты исследования которых приведены на рис. 6, а и б, неидентичны, тем не менее обе кривые имеют одинаковые качественные признаки. Рассмотренный пример убедительно показывает, что вихре-

токовым методом можно надежно регистрировать отклонения в твердости материала рельса до 10 %.

Результаты вихретоковых испытаний рельсов

В 2000 г., когда началось регулярное применение вихретокового метода дефектоскопии рельсов, на одном из криволинейных участков пути с высокой грузонапряженностью было отмечено, что усталостные трещины распределяются вдоль кривой неравномерно: короткие участки со скоплением трещин чередовались с неповрежденными зонами. Для измерений был выбран участок длиной 100 м. На рис. 7 каждая точка означает число трещин на отрезке длиной 1 м. Первые результаты испытаний были получены в июле 2000 г.

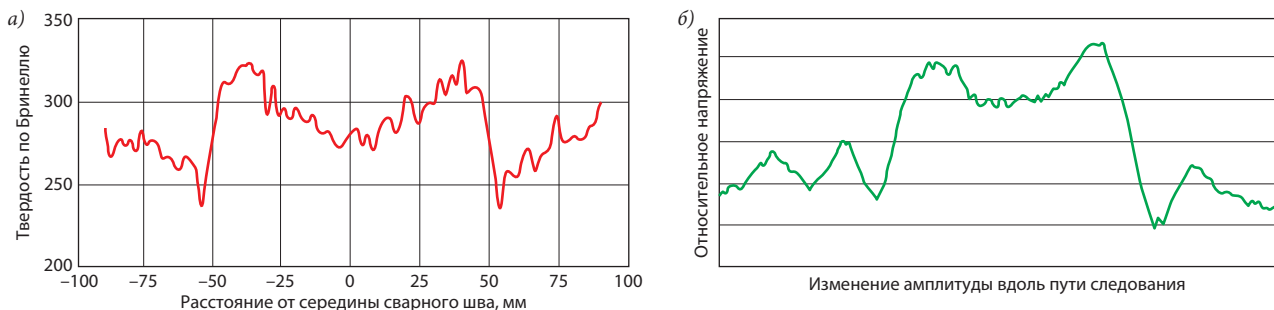


Рис. 6. Изменение твердости рельса (а) и сигналов вихревых токов (б) в шве, выполненном термитной сваркой

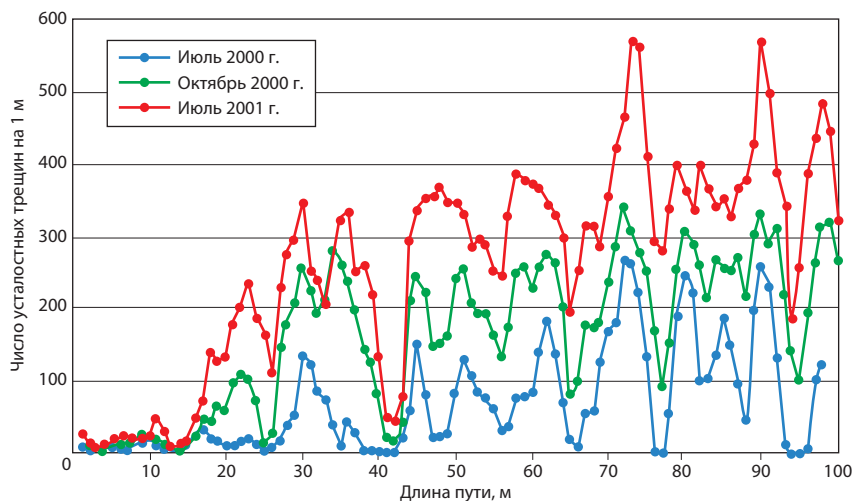


Рис. 7. Распределение интенсивности образования усталостных трещин

Из соответствующей ломаной линии на рис. 7 видно, что на отрезке от начала кривой примерно до 25-го метра наблюдалось незначительное число трещин. Ломаная линия для следующего за ним отрезка длиной 10–20 м уже имеет и максимум, и минимум. Абсолютный максимум результатов этого месяца составил 280 трещин на 1 м.

Следующие измерения проводились в октябре 2000 г. и июле 2001 г. Было установлено, что трещины в рельсе существенно проявляются на расстоянии примерно 10 м от начала кривой, далее их плотность в целом увеличивается. После года наблюдений абсолютное максимальное значение составило примерно 580 трещин на 1 м. Примечательно то, что расположение минимумов и максимумов практически не изменилось. Так, в зоне 40-го метра поражение усталостными трещинами практически отсутствовало. Очевидно, на рассматриваемом криволинейном участке пути имеется область, в которой происходит наиболее быстрый рост трещин, и эта область, вероятно, возникает периодически.

В июне 2007 г. в выбранной для исследований кривой на высокоскоростной линии с путем на жестком основании были проведены измерения вихретоковым ме-

тодом. Выявленные при этом трещины устраняли путем шлифования. Для измерений использовали рельсошлифовальный поезд RR MB-15, оборудованный встроенной системой вихретокового контроля компании Speno International. Здесь, как и в поезде для дефектоскопии рельсов, предусмотрено четыре датчика на рельс, размещаемых в области рабочей грани головки рельса. Цель проводившихся исследований заключалась в том, чтобы подтвердить пригодность разработанной системы контроля для регулярной эксплуатации. При нулевом измерении (измерительном проходе поезда без шлифования) можно было наблюдать волнообразные изменения поступающего сигнала.

На рис. 8 представлены измеренные в кривой сигналы от четырех датчиков обоих рельсов на отрезке длиной 20 м. Справа показаны кривые для наружного рельса, слева — для внутреннего. Показания датчиков S1, расположенных над рабочей гранью головки рельса, приведены на нижних графиках. Шаг расположения датчиков поперек поверхности катания рельса составляет 6 мм. На наружном рельсе проявляется волнообразный характер измерительных сигналов. По направлению к продольной оси рельса кривые становятся более плоскими.

Далее, как показали наблюдения, места повреждения трещинами практически всегда совпадали с вершинами волн. В зонах впадин трещины, как правило, не наблюдались. Кривые, полученные для внутреннего рельса, не имели таких особенностей.

Анализ кривых, приведенных на рис. 6, показывает, что некоторая «шероховатость» линий, отражающая наличие усталостных трещин, проявляется лишь в области вершин полученных кривых. Тем не менее встроенная в шлифовальный поезд система при измерениях, выполняемых с шагом в 1 мм, смогла выявить наличие усталостных трещин. По сигналам, указывающим на наличие трещин, система машины рассчитывает вероятную глубину повреждений и число трещин на 1 м пути, что необходимо для задания режима шлифования.

Для трех измерительных датчиков была выполнена автоматическая оценка глубины трещин по всей длине шлифования (около 1000 м). В результате получены распределение плотности трещин (их число на 1 м длины рельса), а также значения глубины трещин в миллиметрах для кривых каждого из трех датчиков.

На одной из полученных кривых, снятых с помощью датчика, расположенного над продольной осью поверхности катания рельса, признаков образования усталостных трещин не выявлено. Наибольшая глубина повреждений, достигавшая 1,2 мм, отмечена на рабочей грани головки рельса и зафиксирована на 750-м метре контрольного участка. Довольно значительный усталостный износ обнаружен третьим датчиком. Интенсивность усталостного износа, отраженная в кривой, снятой этим датчиком, соответствует глубине трещин, достигающей 0,9 мм.

В ходе продолжавшегося шлифования трещины устраняли. После того как в среднем съем металла

в зоне рабочей грани головки рельса составил 0,8 – 1 мм, усталостные трещины на рельсах рассматриваемой кривой были полностью устранены. Это в значительной степени достигнуто благодаря результатам вихретокового обнаружения усталостных трещин. Дополнительно полученные кривые утратили волнообразный характер.

Результаты наблюдений позволили предположить, что волнообразные сигналы в значительной степени вызваны ростом твердости, обусловленным образованием наклепа на наружном рельсе в кривой. Можно принять, что состояние рельсов, соответствующее впадинам волн, близко к нормальному (без роста твердости), в то время как амплитуды вершин волн кор-

релируются с состоянием повышенной твердости. В зонах с повышенной твердостью и образуются усталостные трещины.

Исследование на образце рельса и подтверждение высказанных предположений

На участке с нешлифованными рельсами был взят образец для лабораторных исследований. Проведенная магнитно-порошковая флюоресцентная дефектоскопия выявила почти равномерную полосу трещин по всей длине образца. Ширина полосы составляла 12–15 мм. Отдельные трещины часто прерывались по длине и располагались на расстоянии 1–2 мм друг от друга, иногда даже ближе. Такая

плотность позволяла ожидать показателя интенсивности 500–600 трещин на 1 м.

Твердость в краевой зоне определяли на шлифе, полученном из рассматривавшегося образца. Для этого путем замеров находили, как изменяется микротвердость в четырех точках по глубине от поверхности рельса. Установлено, что в среднем микротвердость по Виккерсу составляет около 270 HV1 для исходного материала. В зоне трещин микротвердость заметно повышалась и в среднем была равна 352 HV1. Повышенные значения твердости сохранялись по всей глубине трещин. Максимальная глубина трещины на шлифе была примерно 0,6 мм.

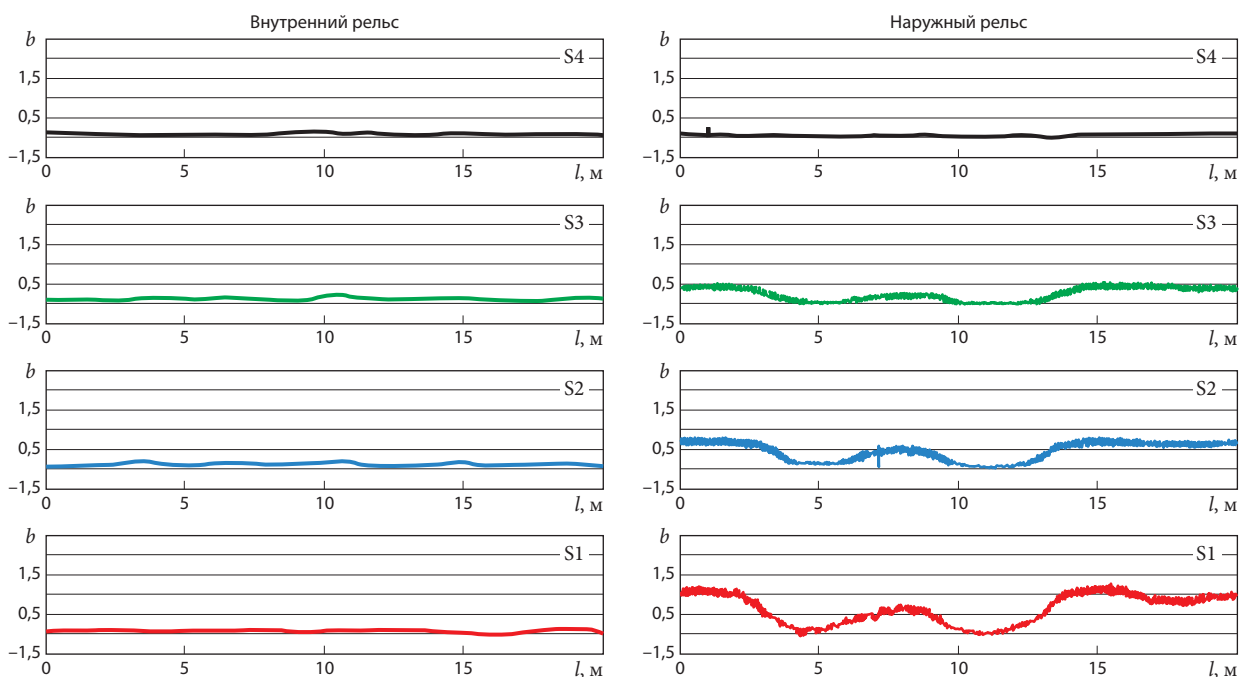


Рис. 8. Вихретоковые сигналы, полученные при измерениях на внутреннем и наружном рельсах в кривой высокоскоростного пути

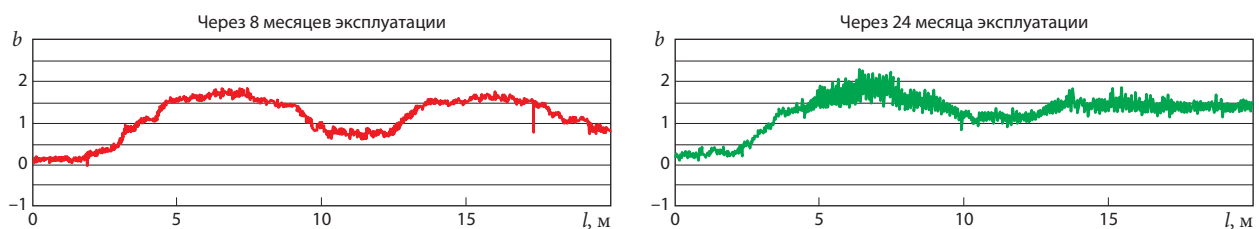


Рис. 9. Сигналы вихревых токов в наружном рельсе кривой

Проведенные на образце исследования подкрепили предположение о том, что в эксплуатации сначала образуется наклеп, а трещины возникают позднее в областях с повышенной твердостью. Если это предположение справедливо, то в условиях эксплуатации должна наблюдаться следующая последовательность развития повреждений. В исходном состоянии, например, после окончания строительства нового пути линия сигналов представляет собой прямую, и уровень ее примерно соответствует стандартному качеству нового рельса. Спустя некоторое время, в течение которого действуют эксплуатационные нагрузки (рассматривается наружный рельс кривой), возникает сначала волнообразная структура сигналов, коррелирующихся с твердостью, являющейся результатом наклепа. Затем в местах с повышенной твердостью (в вершинах волн кривой) появляются искажения формы кривой, говорящие о наличии в этих местах усталостных трещин.

С учетом этого были рассмотрены старые, уже архивированные данные с результатами измерений. Они фактически подтвердили высказанные предположения. Были проведены также повторные измерения прибором WPG в тех же местах; полученные результаты представлены на рис. 9. Речь при этом шла об участке новой линии. К сожалению, результаты измерений, выполненных непосредственно после строительства, отсутствовали, так как, естественно, в тот момент появления трещин не ожидали. Первые измерения проводили после 8 мес эксплуатации. Они показали, что уже образовались волнообразные структуры, которые, согласно ранее изложенным соображениям, обусловлены ростом твердости. После 24 мес эксплуатации появились заметные усталостные трещины в местах, соответствующих вершинам волн.

Рассматривались также результаты других исследований, которые часто совпадали с рассмотренными. Оценка результатов испытаний, выполненных шлифовальным поездом, подтвердила, что самые глубокие из обнаруженных трещин соотносятся с максимумами вершин волн твердости. Далее, рассматривая кривую сигналов, можно видеть, что впадины волн становятся все короче. Это свидетельствует о тенденции к смыканию областей, пораженных усталостными трещинами.

Выводы

Результаты исследований показывают, что усталость рельсов, обусловленная контактом качения и приводящая к возникновению трещин, наблюдается преимущественно там, где в процессе эксплуатации образуется наклеп. При измерениях наличие наклепа можно обнаружить по повышенным значениям твердости.

Вихретоковые испытания рельсов первоначально вводили с целью обнаружения усталостных трещин и определения их глубины. Однако поскольку наведение вихревых токов в испытуемом объекте в значительной степени зависит от структуры его материала, становятся хорошо видимыми различия в твердости. Благодаря этому в принципе возможно прогнозирование мест возникновения будущих трещин. Это может способствовать лучшему пониманию зависимости между возникновением трещин и реальными условиями эксплуатации, а также оказывать помощь в разработке предупредительных мероприятий по техническому обслуживанию пути.

По материалам Федерального института исследований и испытаний материалов (http://www.bam.de/de/geraete_objekte/fg84_schienepruefsystem.htm) и компании DB Systemtechnik (<http://www.db-systemtechnik.de>).

«ZHELEZNYE DOROGI MIRA»
Rail International/
Schienen der Welt
Russian edition
The monthly magazine
of JSC «RZD»

CONTENTS

News	2
Transport policy. Reforms	
Outlooks of European freight transport	9
Problems of developing railways of Turkey and Central Asia	12
Improving passenger services in SAR	19
Outlooks of developing railways of Israel	25
Rolling stock	
Velaro D for Germany	30
Modern requirements to high-speed trains	38
On mutual recognizing results of certification	44
Autonomous freight car for FlexCargoRail system	46
Comparison of wheelset axles design methods	53
Program of energy saving on SBB network.	61
On-train communications and competitiveness of railways	67
Infrastructure	
Problems of interaction at wheel — rail system	71
Early detection of fatigue cracks in rails	75

On the cover: Presentation of high-speed electric train Velaro D for German railways (photo: DB)

Postal address:
Russia, 117556, Moscow,
Bolotnikovskaya street, 5,
building 3, office 2

Editor-in-Chief E. F. Ershov

Tel./Fax: (499) 317-55-65

E-mail: zdm@css-rzd.ru