

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ИЗНАШИВАНИЯ РЕЛЬСОВ В КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ

© 2011 А.В. Шакина<sup>1</sup>, С.В. Биленко<sup>2</sup>, В.С. Фадеев<sup>3</sup>, О.В. Штанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Комсомольский-на-Амуре филиал ООО «НТЦ Информационные технологии»

<sup>2</sup> Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

<sup>3</sup> ООО «НТЦ Информационные технологии»

Поступила в редакцию 30.11.2011

Рассмотрены факторы, влияющие на износ в системе «колесо-рельс». Приведены результаты металлографических, электронно-микроскопических и рентгенофазовых исследований образцов рельсов с различным боковым износом. Сделан вывод о двойственном характере разрушения поверхностного слоя боковой грани рельсов в кривых, включающем отслаивание материала в результате развития поверхностных трещин, а также разрушение, обусловленное развитием волосяных по межслоевым границам. В поверхностном слое обнаружены растягивающие напряжения, способствующие развитию трещин. На основе анализа экспериментальных данных сделан вывод о превалировании контактно-усталостного механизма изнашивания рельсов в кривых на ДВЖД.

Ключевые слова: система «колесо-рельс», контактно-усталостный механизм, изнашивание, поверхностный слой

В процессе износа пары колесо-рельс происходит повреждение как колеса (прокат, износ гребня), так и рельса (вертикальный и боковой износ головки). Особенно велико значение бокового износа рельсов и гребней колес при движении состава в криволинейных участках пути (т.н. кривых) вследствие набегания гребня на рельс. Гребень колеса скользит по боковой грани головки рельса при одновременном качении бандажа по ее поверхности катания [1]. В зоне контакта гребня и боковой поверхности головки рельса происходит рост напряжений сдвига, которые значительно больше напряжений в зоне качения, и, как следствие, появляется повышенный износ рельса. В многочисленных исследованиях изнашивания в системе «колесо-рельс» рассматриваются различные факторы, влияющие на износ, и механизмы износа [2]. На разных участках железной дороги превалируют те или иные факторы, определяющие интенсивность изнашивания в системе «колесо-рельс». Соответственно, преобладающие механизмы износа отличаются.

Шакина Антонина Владимировна, инженер-исследователь. E-mail: antoninakom@rambler.ru

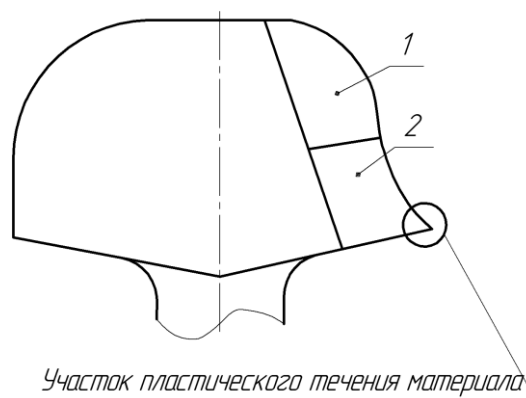
Биленко Сергей Владимирович, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения». E-mail: s.bilenko@knastu.ru

Фадеев Валерий Сергеевич, доктор технических наук, исполнительный директор. E-mail: infotech.mos@gmail.com

Штанов Олег Викторович, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе. E-mail: infotech.kms@gmail.com

**Цель исследования:** выявить тип изнашивания, характерный для Дальневосточной железной дороги.

Особое внимание уделяется износу боковой поверхности рельсов в кривых, т.к. эта проблема актуальна для Дальнего Востока – благодаря особенностям рельефа кривые составляют значительную долю местных железных дорог.



**Рис. 1.** Схема вырезки образцов для металлографических исследований (плоскость шлифа совпадает с плоскостью рисунка)

**Методика проведения исследований.** Для выявления механизмов изнашивания рельсов, прежде всего, их боковой поверхности, проведены металлографические, электронно-микроскопические и рентгеноструктурные исследования образцов изношенных рельсов. Металлографические исследования позволили

выявить структуру поверхностного слоя изношенной стороны головки. Рассматривались образцы с боковым износом 2,5; 3,5; 8; 10; 12 мм. Схема вырезки образцов из боковой поверхности рельса приведена на рис. 1.

Электронно-микроскопические исследования проведены с помощью растрового электронного микроскопа LEO EVO 40HV с энергодисперсионным детектором INCA Energy 350. Подготовка образцов осуществлялась аналогично подготовке шлифов для металлографических исследований. Рентгеноструктурные исследования осуществлены с помощью дифрактометра ДРОН-7. Применялось характеристическое рентгеновское излучение меди  $\text{Cu K}_\alpha$  (длины волн дублета  $\lambda_1 = 1,54051 \text{ \AA}$  и  $\lambda_2 = 1,54433 \text{ \AA}$ ). Напряжение трубки – 40 кВ, ток накала катода – 20 мА.

Методом рентгеноструктурного анализа исследовались образцы рельсов, вырезанных из изношенной и неизношенной части головки, а также образцы, изготовленные из изношенной части головки и подвергнутые отпуску при температуре 450°C для снятия напряжений в поверхностном слое. Боковой износ образцов – 8, 10 и 12 мм (пропущенный тоннаж 400 млн. т брутто). Схема вырезки образцов показана на рис. 2. Исследовалась поверхность износа образцов 1, 2, 3 и наружная поверхность образцов 1<sub>н</sub>, 2<sub>н</sub>, 3<sub>н</sub>.

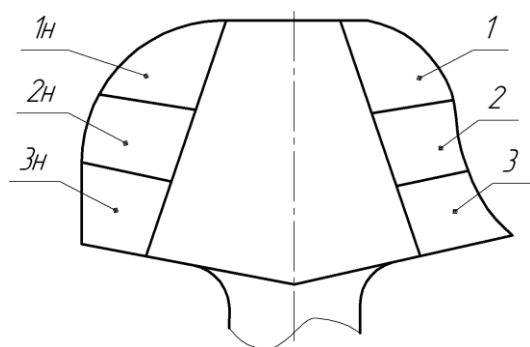


Рис. 2. Схема вырезки образцов для рентгеноструктурного анализа

**Результаты металлографических исследований.** В поверхностном слое всех образцов обнаружена зона пластической деформации. Ширина зоны различна у разных образцов и в пределах одного образца. Как правило, зона деформации состоит из двух частей, граница между которыми не всегда четкая. Первая часть, ближе к поверхности – зона полосчатости, в которой невозможно различить зерна, а иногда и отдельные полосы (методом оптической микроскопии). Деформированные слои этой зоны вытянуты вдоль поверхности рельса. Вторая часть – переходная зона, в

которой видны сильно деформированные зерна, вытянутые вдоль поверхности рельса. Описанные зоны показаны на фото (см. рис. 3). Соотношение размеров этих двух зон различно для разных образцов и в пределах одного образца, в среднем составляет 50%. Иногда переходная зона отсутствует. Средние значения ширины зоны пластической деформации для образцов с разной степенью бокового износа варьируются в пределах 70-120 мкм, значения ширины переходной зоны – в пределах 30-60 мкм. Степень деформации зерен в переходной зоне (отношение размера зерна, измеренного по нормали к кромке, к размеру, измеренному вдоль нее), увеличивается от глубины к поверхности и доходит до 5 раз.

В поверхностном слое образца обнаружены многочисленные трещины усталостной природы. Они зарождаются на дефектах поверхности и проникают вглубь материала по мере увеличения количества циклов нагружения, определяемого пропущенным тоннажем. Как правило, трещины составляют с поверхностью рельса угол в диапазоне 0-35° (см. рис. 3, 4). Длина описанных трещин может достигать 200-300 мкм, а в отдельных случаях и больше.

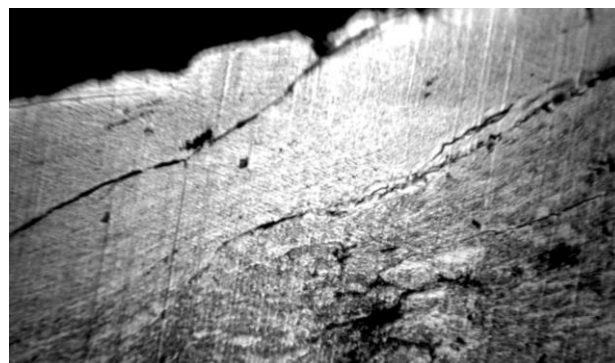


Рис. 3. Трещины, зона полосчатости и переходная зона образца рельса с боковым износом 12 мм. x1200

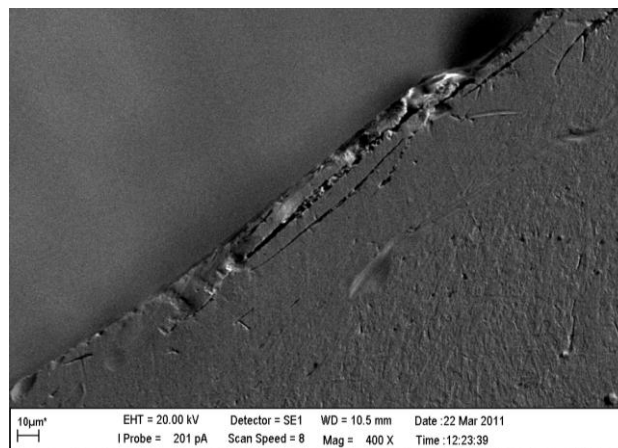
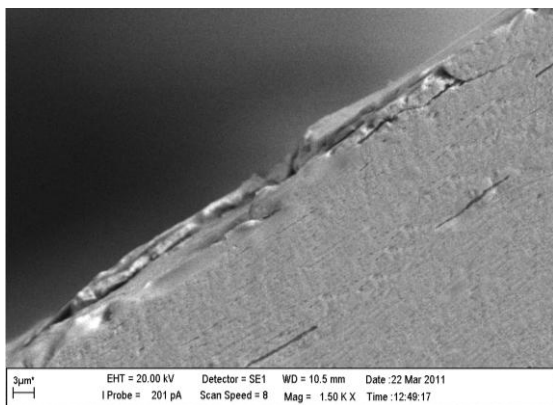
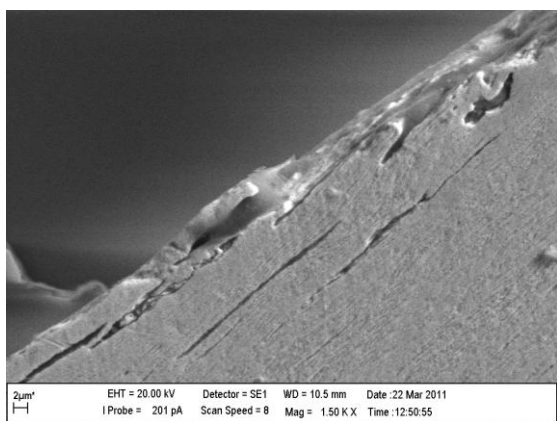


Рис. 4. Трещины в поверхностном слое образца (боковой износ 3,5 мм). x400

**Результаты электронно-микроскопических исследований.** Методом растровой микроскопии в поверхностном слое образцов обнаружены волосовины (см. рис. 5), вызывающие расслоение материала (см. рис. 6), приводящее, в совокупности с трещинами к его разрушению. Образование волосовин связано с накоплением дефектов на границах слоев материала рельса, подвергающегося ударам, а также постоянным сдвиговым деформациям в результате набегания гребня колеса на боковую поверхность рельса. Слияние волосовин, которые становятся концентраторами напряжений, в трещины приводит к расслоению подповерхностного слоя материала. В результате слои материала теряют сцепление с основой, происходят многочисленные сколы металла боковой поверхности, приводящие к износу.



**Рис. 5.** Волосовины в поверхностном слое образца рельса с боковым износом 3,5 мм. x1500



**Рис. 6.** Расслоения в поверхностном слое образца с боковым износом 3,5 мм, вызванные слиянием волосовин. x1500

**Результаты рентгеноструктурных исследований.** Анализ поверхностных слоев рельса показал, что все наблюдаемые на дифрактограммах линии соответствуют железу, параметр элементарной ячейки  $\alpha$ -железа  $a=2,8664$  Ангстрем. Оксиды и карбиды железа

на рентгеновских спектрах не обнаружены, поэтому рентгеновские спектры для каждого образца были сняты в диапазоне углов, соответствующих трем основным линиям эталонного железа с максимумами  $2\theta = 44,671^\circ$  (110);  $65,018^\circ$  (200);  $82,329^\circ$  (211). Другие линии не снимались из-за невозможности отделения их от фона. В табл. 1, 2 показаны относительные сдвиги линии железа, соответствующей межплоскостному направлению (110), которая была зарегистрирована для всех образцов. Расчеты проводились согласно следующим формулам:

- таблица 1:

$$\Delta d = \frac{d_{\text{эксн}} - d_{\text{этал}}}{d_{\text{эксн}}} \cdot 100\%$$

- таблица 2:

$$\Delta d = \frac{d_{\text{изнош}} - d_{\text{неизнош}}}{d_{\text{неизнош}}} \cdot 100\%$$

где  $\Delta d$  – относительный сдвиг межплоскостных расстояний;  $d_{\text{эксн}}$  – межплоскостное расстояние (в ангстремах), полученное при съемке образца;  $d_{\text{этал}}$  – межплоскостное расстояние эталона (в ангстремах);  $d_{\text{изнош}}$  – межплоскостное расстояние (в ангстремах) для изношенного образца;  $d_{\text{неизнош}}$  – межплоскостное расстояние (в ангстремах) для неизношенного образца. Для других линий железа (200) и (211) провести полный аналогичный систематический анализ не удалось.

Относительные сдвиги линии железа по сравнению с эталоном (табл. 1), показывают наличие растягивающих напряжений в поверхностном слое образцов. Эти напряжения являются «пищей» для роста усталостных трещин, разрушающих боковую поверхность рельсов в кривых. В образцах, подвергнутых отпуску, напряжения растяжения отсутствуют либо заменены напряжениями сжатия, подавляющими рост трещин.

В табл. 2 приведено относительное смещение пиков железа в процентах для боковой поверхности с изношенной и неизношенной стороны (без отпуска). Как видно, напряжения в выкружке рельса (образцы с номером 1) практически не отличаются для изношенной и неизношенной стороны головки, но по мере приближения к нижней части головки, где в результате пластической деформации образуется «натек» материала (см. рис. 1), разница напряжений становится все существеннее. Из этого можно заключить, что напряжения на выкружке рельса обусловлены процессом его изготовления, в то время, как напряжения в других частях головки возникают в процессе эксплуатации.

**Таблица 1.** Относительное смещение пика железа (110) в процентах по сравнению с линией эталонного железа для изношенной и неизношенной сторон

Номер образца	Боковой износ 8 мм		Боковой износ 10 мм		Боковой износ 12 мм	
	без отпуса	отпуск	без отпуса	отпуск	без отпуса	отпуск
1	0,22	0,00	0,14	-0,03	0,14	0,03
2	0,12	-0,07	0,10	-0,01	0,16	-0,11
3	0,14	-0,14	0,24	0,03	0,18	0,05
среднее	0,16	-0,07	0,16	-0,003	0,16	-0,01
1 <sub>н</sub>	0,21	—	0,14	—	0,14	—
2 <sub>н</sub>	0,10	—	0,09	—	0,14	—
3 <sub>н</sub>	0,12	—	0,21	—	0,15	—
среднее	0,14	—	0,14	—	0,14	—

**Таблица 2.** Относительное смещение пиков железа в процентах для боковой поверхности с изношенной и неизношенной стороны (без отпуса)

Пик	Номер образца	Боковой износ 8 мм	Боковой износ 10 мм	Боковой износ 12 мм
110	1	0,03	0,02	0,02
	2	0,11	0,09	0,16
	3	0,13	0,13	0,13
	Среднее	0,09	0,08	0,10

Равенство напряжений на выкружке рельса для изношенной и неизношенной стороны головки может объясняться особенностями износа именно этой части боковой поверхности. Вероятно, на выкружке рельса преобладает молекулярно-механический механизм изнашивания, реализуемый благодаря меньшей скорости относительного скольжения в зоне радиуса, благодаря чему контактно-усталостные повреждения не успевают возникнуть в связи с быстрым разрушением поверхностного слоя, и усиления напряжений не происходит.

**Выводы:**

1. Поверхностный слой рельсов имеет ярко выраженную зону пластической деформации, ширина которой различна даже в пределах одного образца, но в среднем не превышает 100 мкм.

2. Зона пластической деформации состоит, как правило, из двух частей: зоны полосчатости и переходной, которая составляет 10-50%

от общей ширины зоны пластической деформации.

3. Трещины в поверхностном слое образцов развиваются в зоне полосчатости, практически параллельно поверхности рельса, вдоль деформированных слоев. Вероятно, их росту способствуют дислокации, накопленные в этой зоне. Толщина участков поверхности, отрезаемых трещинами, невелика, т.к. им энергетически более выгодно развиваться вдоль границы слоев с накопленными дислокациями, чем пересекать слой с меньшей концентрацией дефектов, уходя в глубину от поверхности.

4. Износ средней части боковой поверхности рельсов определяется двумя процессами: ростом усталостных трещин вглубь материала и расслоением материала в результате слияния волосовин.

5. Рентгеноструктурный анализ выявил растягивающие напряжения в поверхностном слое рельсов, что способствует росту поверхностных трещин.

6. Превалирующим механизмом изнашивания боковой поверхности рельсов в кривых участках пути на Дальневосточной железной дороге является контактно-усталостный в сочетании с молекулярно-механическим механизмом, преобладающим в зоне выкружки рельса.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Греб, М. Пути снижения износа колес и рельсов // Железные дороги мира. 2002. № 4. С. 68-72
2. Лужнов, Ю.М. Нанотрибология сцепления колес с рельсами. Реальность и возможности. – М.: Интекст, 2009. 176 с.

## RESEARCH OF WEAR PROCESS MECHANISMS AT RAILS IN CURVILINEAR SITES OF THE RAIL ROAD

© 2011 A.V. Shakina<sup>1</sup>, S.V. Bilenko<sup>2</sup>, V.S. Fadeev<sup>3</sup>, O.V. Shtanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Komsomolsk-on-Amur branch of Scientific and Technological Centre  
“Informational Technologies” Ltd.

<sup>2</sup> Komsomolsk-on-Amur State Technical University

<sup>3</sup> Scientific and Technological Centre “Informational Technologies” Ltd.

The factors influencing on wearing in system “wheel-rail” are considered. Results of metallographic, electron microscopy and X-ray-phase researches of rail samples with various lateral wear are resulted. The conclusion on dual character of surface layer destruction at lateral face of rails in the curves, including scaling of a material as a result of surface cracks development and also the destruction caused by development of tiny cracks on inter-layer borders is drawn. In surface layer the pulling stresses promoting development of cracks are found out. On the basis of experimental data analysis the conclusion about prevalence of contact-fatigue mechanism of wear process at rails in curves at Far East Rail Road is drawn.

Key words: *system “wheel-rail”, contact-fatigue mechanism, wear process, surface layer*

---

*Antonina Shakina, Engineer-Researcher. E-mail: antoninakom@rambler.ru*

*Sergey Bilenko, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department  
“Machine Building Technology”. E-mail: s.bilenko@knastu.ru*

*Valeriy Fadeev, Doctor of Technical Sciences, Executive Director. E-mail:  
infotech.mos@gmail.com*

*Oleg Shtanov, Candidate of technical Sciences, Deputy Director on Scientific  
Work. E-mail: infotech.kms@gmail.com*