

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ 100-МЕТРОВЫХ РЕЛЬСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ*

Кормышев В.Е.¹, к.т.н., инженер кафедры естественнонаучных дисциплин
им. В.М. Финкеля (8923923000@mail.ru)

Полевой Е.В.², начальник бюро металловедения и термической обработки технического отдела
рельсовой площадки (Egor.Polevoj@evraz.com)

Юрьев А.А.², к.т.н., менеджер по управлению продуктами и ресурсами (ant-yurev@yandex.ru)

Громов В.Е.¹, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин
им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Иванов Ю.Ф.³, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник (yuf55@mail.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² АО «ЕВРАЗ – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
(654043, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ш. Космическое, 16)

³ Институт сильноточной электроники СО РАН
(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3)

Аннотация. Методами современного физического материаловедения выполнен анализ структурно-фазовых состояний и механических свойств поверхности катания на расстоянии от 0 до 22 мм по центральной оси и по выкружке дифференцировано закаленных 100-м рельсов категории ДТ 350 производства АО «ЕВРАЗ – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» после длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 1411 млн. т брутто) на экспериментальном испытательном кольце. По химическому составу металл рельсов удовлетворяет требованиям ТУ 0921-276-01124323 – 2012 для стали марки Э76ХФ. Ударная вязкость и твердость на поверхности катания головки и по сечению соответствуют требованиям ТУ. Микроструктура металла рельсов представлена мелкодисперсным пластинчатым перлитом 1,5 балла с включениями избыточного феррита по границам зерен (1,5 балла шкалы № 7 ГОСТ 8233). Межпластинчатое расстояние в головке рельса изменяется в пределах 0,10 – 0,15 мкм. Длительная эксплуатация рельсов сопровождается формированием градиентной структуры, выражающейся в закономерном изменении твердости, микротвердости, ударной вязкости по сечению головки рельсов. Микротвердость на глубине 2 мм от поверхности катания составляет 1481 – 1486 МПа. На глубине до 10 мм микротвердость снижается до 1210 – 1385 МПа, что обусловлено увеличением межпластинчатого расстояния и снижением уровня деформационного упрочнения металла при длительной эксплуатации рельсов. Высказано предположение, что это может быть обусловлено увеличением межпластинчатого расстояния и снижением уровня деформационного упрочнения при длительной эксплуатации.

Ключевые слова: структура, твердость, микротвердость, дифференцировано закаленные рельсы, длительная эксплуатация.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-2-108-115

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при производстве длинномерных рельсов наибольшее распространение получили методы дифференцированной закалки. Эти современные методы лишены недостатков объемной закалки [1]. Проблема эволюции структуры и свойств рельсов при длительной эксплуатации представляет сложный комплекс взаимосвязанных научных и технических вопросов. Одним из наиболее важных направлений развития представлений о природе структурно-фазовых превра-

щений является установление соответствующих количественных закономерностей по сечению рельсов.

В современных условиях высоких нагрузок на ось и скоростей движения поверхностные слои рельсов испытывают при длительной эксплуатации интенсивные пластические деформации, которые приводят к повреждениям. Это может явиться причиной изъятия рельсов [2]. Анализ работ [3 – 8] показывает, что уже при сравнительно небольшой (100 – 500 млн. т брутто) наработке в поверхностных слоях рельсов формируются структурно-фазовые состояния с аномально высокой микротвердостью, малым (в интервале от 20 до 500 нм) размером зерна. Пластины цементита либо изогнуты, либо разрушены, на межфазных границах отмечается крайне высокая плотность дислокаций, происходит

* Авторы выражают благодарность А.М. Юнусову за помощь в проведении экспериментов и обсуждении результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-32-60001).

растворение цементита и образование аустенита за счет обратного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Вполне очевидно, что при интенсивных деформационных воздействиях, реализуемых при длительной эксплуатации, могут происходить различные процессы (рекристаллизационные, релаксационные, фазовые переходы, распад и образование фаз, аморфизация и т.д.), которые приводят к эволюции структурно-фазовых состояний и сопровождаются изменением (деградацией) механических свойств.

В последние годы традиционно подробно освещаются вопросы, связанные с износом рельсов при эксплуатации [9 – 17]. Между дефектами износа и контактной усталости много общего: и те, и другие первоначально формируются в поверхностных слоях [18]. В работе [18] отмечается, что для рельсового металла с повышенной твердостью износ меньше, меньше и толщина пластически деформированного слоя. Высокие скорости износа снижают контактную усталость за счет удаления поверхностных трещин. Отмечено, что начало постоянного износа совпадает с накоплением определенного уровня пластической деформации [19]. Естественно, что подобные заключения должны учитывать соотношение твердости в системе колесо – рельс [20] и их структурно-фазовые состояния и химический состав.

Целью настоящей работы является анализ структуры и свойств дифференцированно закаленных 100-м рельсов при длительной эксплуатации.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования были использованы образцы 100-м дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 из вакуумированной стали марки Э76ХФ, изъятых из пути на экспериментальном полигоне, г. Щербинка после пропущенного тоннажа 1411 млн. т брутто. Химический состав исследуемого фрагмента рельса приведен в табл. 1. По химическому составу металл рельсовой пробы удовлетворяет требованиям ТУ 0921-276-01124323 – 2012 для рельсов категории ДТ350.

Макроструктуру металла выявляли методом глубокого травления в 50 %-ном горячем водном растворе

соляной кислоты на неполном поперечном темплете (головка, шейка). Оценку макроструктуры проводили в соответствии с РД 14-2Р-5 – 2004 «Классификатор дефектов макроструктуры рельсов, прокатанных из непрерывнолитых заготовок электростали» [21]. Микроструктуру металла изучали на шлифах, вырезанных из верхней части головки (выкружки и поверхности катания) до и после травления в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Исследования структуры стали проводили методами оптический микроскопии (прибор Olimpus GX 51) и сканирующей электронной микроскопии (прибор MIRA 3 Tescan).

Ударную вязкость стали определяли при температуре испытания +20 °С на двух образцах первого типа по ГОСТ 9454, вырезанных из головки рельса. Измерение твердости проводили методом Бринелля и Роквелла на поверхности катания и по сечению головки в соответствии с требованиями ТУ 0921-276-01124323 – 2012. Дополнительно провели измерение твердости в верхней части шейки (примерно на 30 мм выше точки б требований п. 1.8.1 ТУ 0921-276-01124323 – 2012), а также по сечению головки в поперечном направлении на расстоянии 2, 10 и 22 мм от поверхности катания головки по вертикальной оси симметрии и от выкружек. Микротвердость определяли прибором ПМТ-3 методом Виккерса при нагрузке на индентор 300 мН на расстоянии 2 и 10 мм от поверхности по месту обеих выкружек и центральной зоны поверхности катания головки пробы по результатам четырех измерений в каждой зоне.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Визуально поверхность катания головки рельсовой пробы имеет сглаженный и блестящий вид, с некоторым смещением износа на одну из выкружек. В зоне рабочей выкружки наблюдаются трещины контактной усталости, расположенные почти под прямым углом к оси прокатки, и небольшие выкрашивания.

Макроструктура металла исследуемого фрагмента по осевой ликвации, точечной неоднородности, ликвационным полоскам и трещинам оценивается удовлетворительно. Каких-либо внутренних дефектов, а также нарушений сплошности на темплетях не выявлено.

Т а б л и ц а 1

Химический состав рельсов категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ

Table 1. Chemical composition of rails of DT350 category made of E76KhF steel

Материал	Содержание химических элементов, %										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Al	Ti
проверочный	0,72	0,77	0,61	0,010	0,009	0,42	0,07	0,14	0,038	0,003	0,003
Требования ТУ 0921-276- 01124323 – 2012	0,71 – 0,82	0,75 – 1,25	0,25 – 0,60	не более		0,20 – 0,80	Σ не более 0,27		0,030 – 0,150	не более	
				0,020	0,020		0,20	0,20		0,004	0,025

С поверхности катания наблюдается более темнотравящаяся область, образование которой связано с деформационными процессами металла, имеющими место при длительной эксплуатации.

При просмотре на оптическом микроскопе нетравленых шлифов, вырезанных из головки пробы, с поверхности рабочей выкружки по месту поверхностных трещин контактной усталости выявлены разветвленные нарушения сплошности, проходящие под острым углом к поверхности на глубину до 1,09 мм (рис. 1). Травление металла рельса в зоне несплошностей позволило выявить структуру с высоким уровнем деформационного наклепа (рис. 2).

На шлифах, вырезанных с поверхности катания головки, встречаются единичные мелкие нарушения сплошности глубиной до 0,03 мм (рис. 3, а). Глубина деформации с поверхности катания незначительна и составляет 0,035 мм (рис. 3, б).

Микроструктура в головке пробы представляет мелкодисперсный пластинчатый перлит с мелкими включениями избыточного феррита (1,5 балл шкалы № 7 ГОСТ 8233) (рис. 4, а, б). Бейнит в микроструктуре металла пробы отсутствует. Микроструктура металла представлена высокодисперсным перлитом

с встречающимися небольшими участками структурно-свободного феррита (рис. 4, в). В перлитной структуре кроме регулярных колоний (с регулярно расположенными пластинами цементита) достаточно много колоний с разрушенными пластинами цементита (рис. 4, з). Присутствуют участки вырожденного перлита.

Результаты количественной оценки микроструктуры приведены в табл. 2. Анализируя результаты, можно отметить более дисперсную структуру перлита поверхности катания относительно структуры перлита выкружки.

Механические свойства стали характеризовали ударной вязкостью, твердостью и микротвердостью. Результаты испытаний приведены в табл. 3. По ударной вязкости и твердости на поверхности катания головки и по ее сечению металл исследуемой пробы удовлетворяет требованиям ТУ 0921-276-01124323 – 2012 для рельсов категории ДТ350. Твердость, измеренная в шейке, несколько повышена относительно требований технических условий.

Дополнительно проведены измерения твердости металла пробы по сечению головки в поперечном направлении методом Роквелла на расстоянии 2, 10 и 22 мм

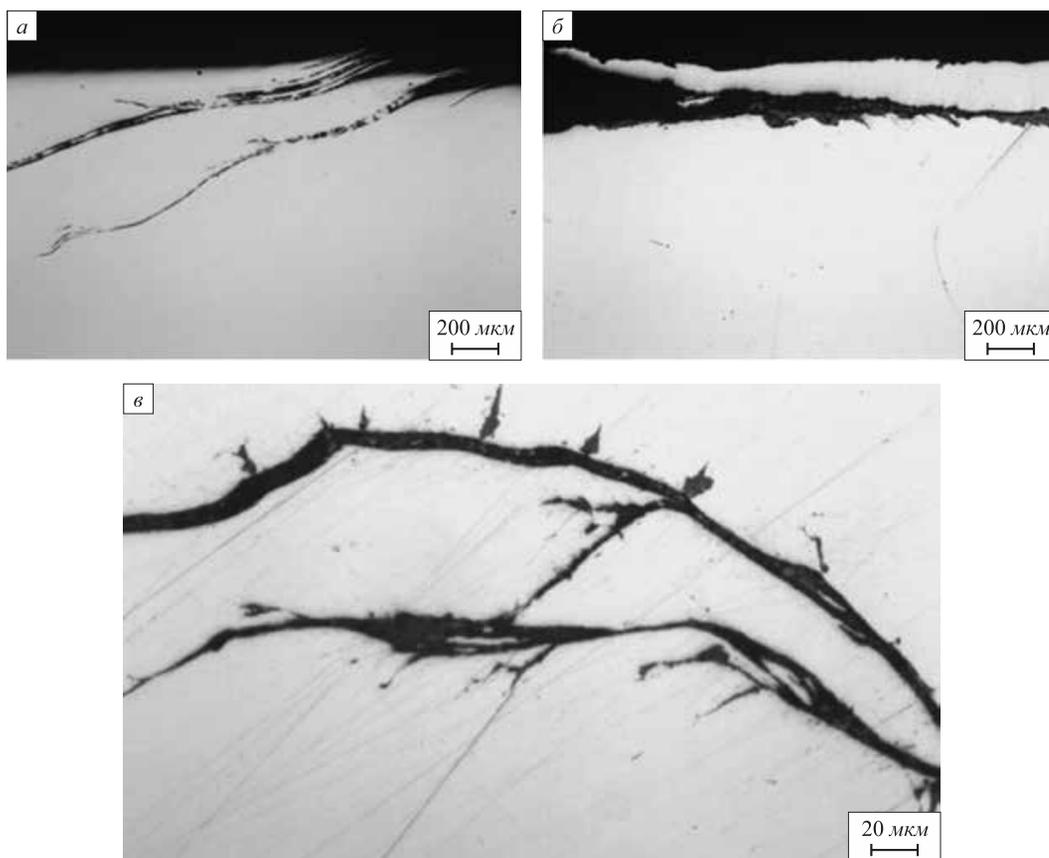


Рис. 1. Разветвленные нарушения сплошности, выявленные в головке рельса с поверхности рабочей выкружки по месту поверхностных трещин контактной усталости (оптическая микроскопия нетравленных шлифов)

Fig. 1. Furcated discontinuities detected in rail head at the surface of working fillet along the place of contact fatigue surface cracks (optical microscopy of unetched sections)

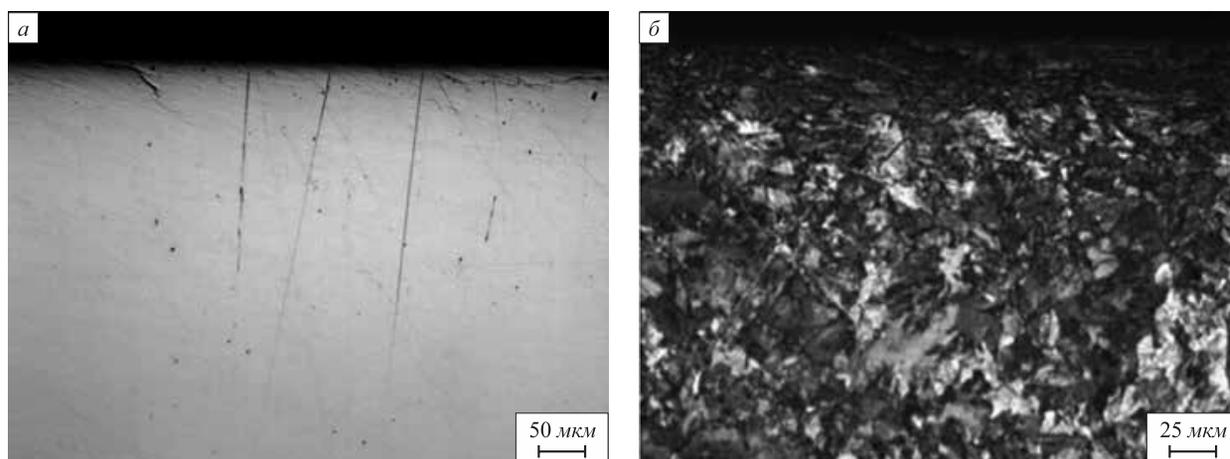


Рис. 2. Структура металла рельса в зоне разветвленного нарушения сплошности, обнаруженного в головке фрагмента рельса с поверхности рабочей выкружки по месту поверхностных трещин контактной усталости (оптическая микроскопия травленных шлифов)

Fig. 2. Structure of rail metal in zone of furcated discontinuity detected in rail head fragment at the surface of working fillet at place of contact fatigue surface cracks (optical microscopy of etched sections)

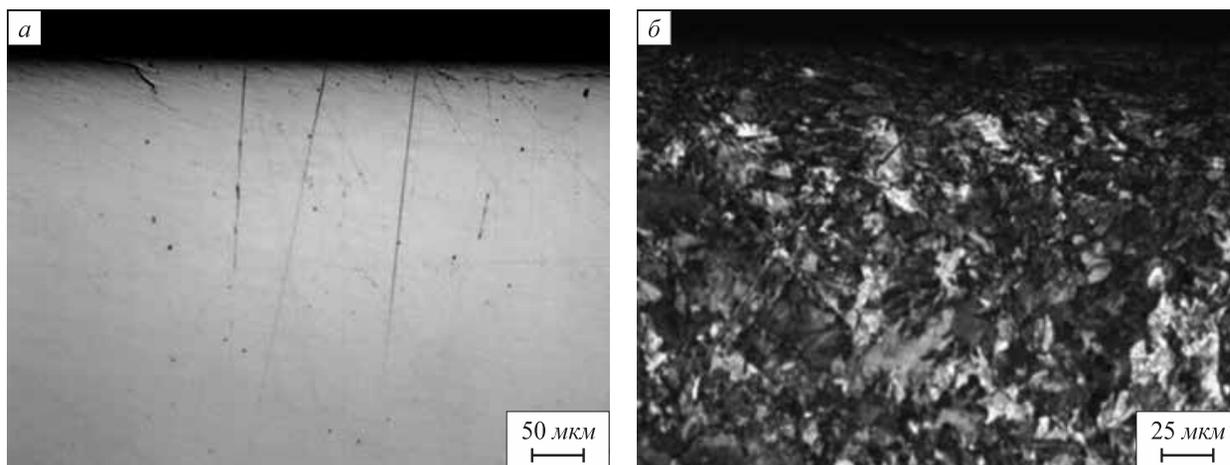


Рис. 3 Структура металла поверхности катания головки рельса. Оптическая микроскопия нетравленного (а) и травленного (б) шлифов

Fig. 3. Metal structure of rolling surface of the rail head. Optical microscopy of un-etched (a) and etched (b) thin sections

от поверхности катания головки по вертикальной оси симметрии и от выкружек (табл. 4.).

Анализ результатов, представленных в табл. 4, показывает, что твердость на глубине 2 мм в центральной зоне и рабочей выкружки выше (38,5 – 37,1 HRC) по сравнению с твердостью нерабочей выкружки (35,3 HRC), что обусловлено наличием в указанной зоне глубокой деформации, сопровождающейся наклепом материала. На глубине 10 и 22 мм от поверхности катания твердость металла ниже на 2 – 3 HRC по сравнению с твердостью на глубине 2 мм и имеет сопоставимые значения (34,8 – 35,8 HRC).

Усредненные (по результатам четырех измерений в каждой зоне) значения микротвердости, определенные на расстоянии 2 и 10 мм от поверхности по месту обеих выкружек и центральной зоны поверхности катания головки, приведены в табл. 5. Микротвердость на глубине 2 мм имеет близкие значения: 1481 – 1475 МПа.

При удалении на глубину 10 мм микротвердость снижается до 1210 – 1385 МПа, что, очевидно, является следствием увеличения межпластиночного расстояния (снижение дисперсности) и снижения уровня деформационного упрочнения металла, имеющего место при длительной эксплуатации рельсов.

Выводы

Методами современного физического материаловедения установлено, что ударная вязкость и твердость на поверхности катания головки и по ее сечению удовлетворяют требованиям ТУ 0921-276-01124323 – 2012 для рельсов категории ДТ350. Твердость, измеренная методом Роквелла на глубине 2 мм от поверхности, составила 38,5 – 37,1 HRC, на глубине 10 и 22 мм – 35,5 – 35,8 HRC и 34,8 – 35,6 HRC соответственно. Микроструктура металла рельсов представлена мел-

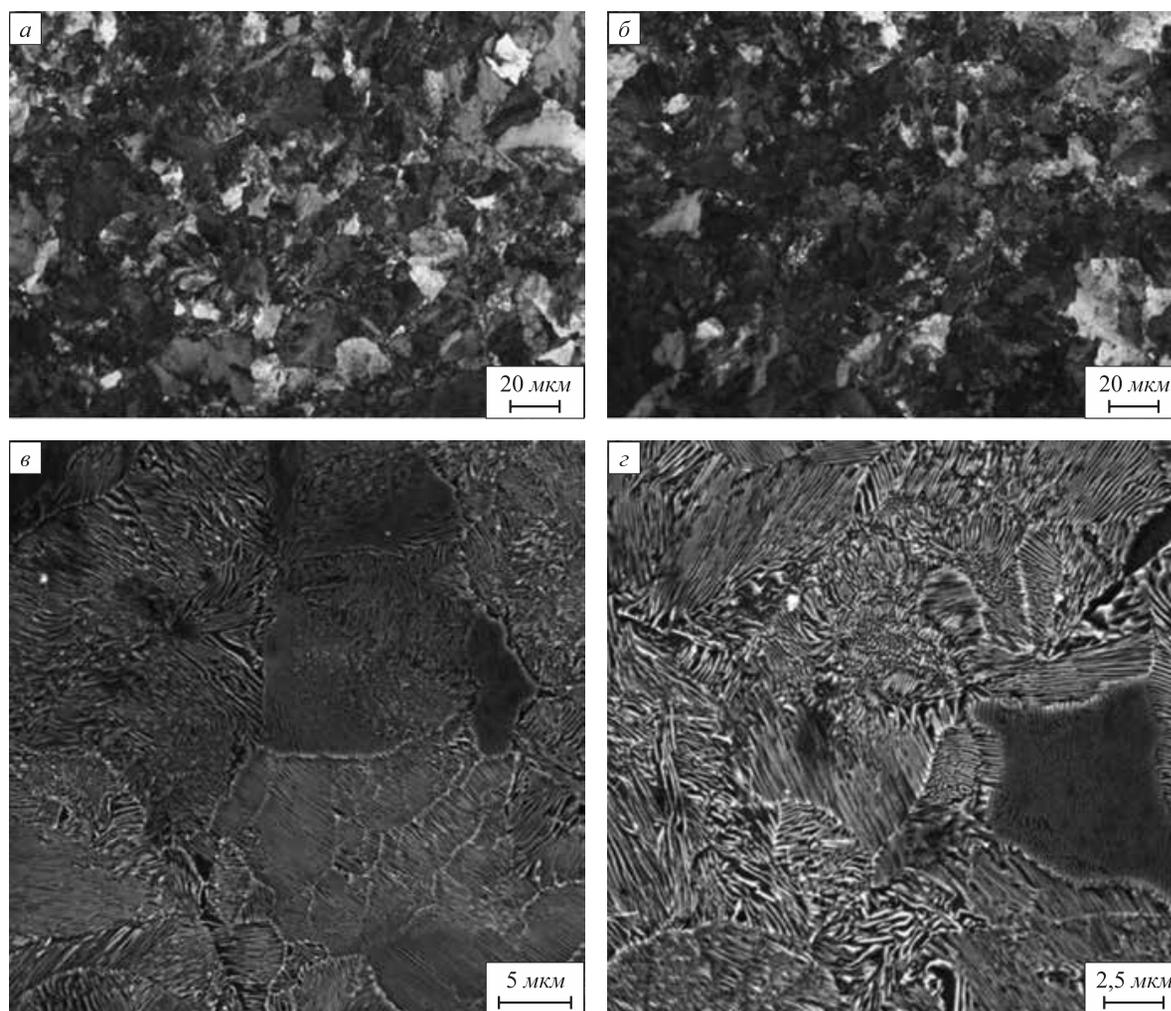


Рис. 4. Структура металла головки рельса, выявленная методами оптической микроскопии (а, б) и сканирующей электронной микроскопии (в, з) травленного шлифа на глубине 0,5 – 1,0 мм

Fig. 4. Metal structure of the rail head, detected by optical microscopy (a, b) and scanning electron microscopy (v, z) of etched thin sections at 0.5 – 1.0 mm depth

Т а б л и ц а 2

Количественные характеристики структуры металла головки рельса, выявленные методами оптической и сканирующей электронной микроскопии травленного шлифа

Table 2. Quantitative properties of structure of metal of the rail head detected by optical and scanning electron microscopy of etched thin section

Место взятия пробы	Межпластинчатое расстояние, мкм			Величина перлитных колоний, мкм			Диаметр зерна, мкм (номер зерна)		
	мин	макс	сред.	мин	макс	сред.	мин	макс	сред.
выкружка	0,073	0,256	0,132	2,711	12,157	6,170	15,042	51,169	29,800
поверхность катания	0,073	0,225	0,125	2,634	10,731	5,600	–	–	–

кодисперсным пластинчатым перлитом 1,5 балла с включениями избыточного феррита по границам зерен (1,5 балл шкалы № 7 ГОСТ 8233). Бейнит в микроструктуре металла рельса не выявлен. Величина межпластинчатого расстояния в головке рельса изменяется в пределах 0,10 – 0,15 мкм. Средняя величина перлит-

ных колоний в зоне выкружки составляет 6,2 мкм, на поверхности катания – 5,6 мкм. Основной массив значений размеров действительного зерна, оцененного только в зоне нерабочей выкружки, составил 7 – 8 номер по ГОСТ 5639 – 82. Микротвердость на глубине 2 мм от поверхности катания составляет 1481 – 1486 МПа.

Ударная вязкость и твердость стали на поверхности катания головки (ПКГ) и по ее сечению, а также в верхней части шейки

Table 3. Impact strength and hardness of steel on the head roll surface (HRS) and its cross-section, as well as in the upper part of the neck

Материал	КСУ +20 °С, Дж/см ²		Твердость НВ на расстоянии, мм					
			ПКГ	10	выкружка		22	шейка
					№ 1	№ 2		
Проба рельса	30	27	388 399	381	364	362	373	345
Требования ТУ 0921-276-01124323 – 2012 для рельсов категории ДТ350	не менее 15		363 – 401	не менее 341			не более 341	

Т а б л и ц а 4

Твердость металла по сечению головки рельса в поперечном направлении

Table 4. Hardness of metal in cross section of the rail head in transverse direction

Место измерения	Твердость HRC на расстоянии от поверхности, мм		
	2	10	22
Рабочая выкружка	38,5	35,5	34,8
Центральная зона	37,1	35,8	35,6
Нерабочая выкружка	35,3	35,5	35,2

На глубине до 10 мм микротвердость снижается до 1210 – 1385 МПа, что обусловлено увеличением межпластиночного расстояния и снижением уровня деформационного упрочнения металла при длительной эксплуатации рельсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Gromov V.E., Yuriev A.B., Morozov K.V., Ivanov Y.F. Microstructure of quenched rails. – Carbide: CISP Ltd, 2016. – 153 p.
- Шур Е.А. Повреждения рельсов. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.
- Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels // Steel Tech. 2008. Vol. 3. No. 1. P. 19 – 23.
- Ivanisenko Yu., MacLaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite // Acta Mater. 2006. Vol. 54. P. 1659 – 1669.
- Ning Jiang-li, Courtois-Manara E., Kurmanaeva L., Ganeev A.V., Valiev R.Z., Kubel C., Ivanisenko Yu. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion // Mater. Sci. and Eng.: A. 2013. Vol. 581. P. 8 – 15.
- Gavriljuk V.G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation // Mater. Sci. and Eng.: A. 2003. Vol. 345. No. 1-2. P. 81 – 89.
- Li Y.J., Chai P., Bochers C., Westerkamp S., Goto S., Raabe D., Kirchheim R. Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite // Acta Mater. 2011. Vol. 59. No. 10. P. 3965 – 3977.

Т а б л и ц а 5

Микротвердость рельсов на расстоянии 2 и 10 мм от поверхности по месту обеих выкружек и центральной зоны поверхности катания

Table 4. Microhardness of rails at a distance of 2 and 10 mm from the surface in place of both fillets and central zone of the rolling surface

Зона измерения	Микротвердость, МПа, на расстоянии от поверхности, мм	
	2	10
Выкружка рабочая	1475	1385
Выкружка нерабочая	1486	1274
Поверхность катания	1481	1210

- Gavriljuk V.G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires // Scripta Mater. 2001. Vol. 45. No. 12. P. 1469 – 1472.
- Шейнман Е. Износ рельсов // Трение и износ. 2012. Т. 33. № 4. С. 413 – 422.
- Анисимов П.С. Влияние конструкции и параметров тележек на износ колес и рельсов // Железнодорожный транспорт. 1999. № 6. С. 38 – 42.
- Gromov V.E., Yuriev A.A., Ivanov Yu.F. et al. Defect substructure change in 100-m differentially hardened rails in long-term operation // Materials Letters. 2017. Vol. 209. P. 224 – 227.
- Gromov V.E., Yuriev A.A., Peregudov O.A. et al. Physical nature of structure and properties degradation of rail surface after long term operation // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1909. P. 020066.
- Влияние износа рельсов и смазки на взаимодействие экипажа пути // Железные дороги мира. 2003. № 9. С. 66 – 70.
- Ермаков В.М. Анализ эффективности работы дорог по снижению износов «колесо-рельс» // Железнодорожный транспорт. 2005. № 7. С. 58 – 64.
- Лысюк В.С. О причинах схода вагонов и износа рельсов в кривых // Железнодорожный транспорт. 2004. № 11. С. 50 – 52.
- Шоповалов В.В., Щербак П.Н., Майба И.А., Костыгов В.Т. Методы устранения износа колес и рельсов // Железнодорожный транспорт. 2004. № 3. С. 111 – 115.
- Grebe M. Пути снижения износа колес и рельсов // Железные дороги мира. 2002. № 4. С. 65 – 72.
- Zhong W., Hu J.J., Shen P. Wang C.Y., Lius Q.Y. Experimental investigation between rolling contact fatigue and wear of high-speed

- and heavy-haul railway and selection of rail material // *Wear*. 2011. Vol. 271. No. 9-10. P. 2485 – 2493.
19. Tyfour W.R., Beynon J.H., Kapoor A. The steady state wear behavior of pearlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions // *Wear*. 1995. Vol. 180. No. 1-2. P. 79 – 89.
20. Singh U.P., Singh R. Wear investigation of wheel and rail steels under conditions of sliding and rolling-sliding contact with particular regard to microstructural parameters // *Wear*. 1993. Vol. 170. No. 1. P. 93 – 99.

21. Распоряжение ОАО «РЖД» № 2499р от 23.10.2014. Об утвержд. и введении в действие Инструкции «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefekтных рельсов». ОАО Российские железные дороги. – М., 2014.

Поступила в редакцию 12 сентября 2019 г.
После доработки 23 октября 2019 г.
Принята к публикации 15 ноября 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. No. 2, pp. 108–115.

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE OF DIFFERENTIALLY HARDENED 100 M RAILS DURING THEIR LONG OPERATION

V.E. Kormyshev¹, E.V. Polevoi², A.A. Yur'ev², V.E. Gromov¹, Yu.F. Ivanov³

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

²JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant”, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

³Institute of High Current Electronics, SB RAS, Tomsk, Russia

Abstract. Using methods of modern physical materials science, structural-phase states and mechanical properties of the rolling surface have been analyzed at distance of 0 to 22 mm along the central axis and along the fillet of differentially hardened 100 m rails of DT 350 category manufactured by JSC “EVRAZ – United West Siberian Metallurgical Plant” after their long-term operation (passed gross tonnage of 1.411 million tons) on experimental test ring. In terms of chemical composition, metal of the rails meets TU 0921-276-01124323 – 2012 requirements for E76KhF steel. Impact strength and hardness on head surface and along cross-section meet TU specifications. Microstructure of rails metal is represented by finely dispersed plate perlite of 1.5 points with inclusions of excessive ferrite along the grain boundaries (1.5 points by GOST 8233 scale No. 7). Interlamellar distance in the rail head varies between 0.10 and 0.15 microns. Long-term operation of rails is accompanied by development of gradient structure, manifested in regular change in hardness, microhardness, impact strength along cross-section of the rail head. Microhardness at 2 mm depth from the rolling surface is 1481 – 1486 MPa. At 10 mm depth microhardness decreases to 1210 – 1385 MPa, which is caused by an increase in interlamellar distance and decrease in the level of strain hardening of metal during long-term operation of rails. It has been suggested that this may be due to an increase in interlamellar distance and a decrease in level of strain hardening during long-term operation.

Keywords: structure, hardness, microhardness, differentially hardened rails, long-term operation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-2-108-115

REFERENCES

- Gromov V.E., Yuriev A.B., Morozov K.V., Ivanov Y.F. *Microstructure of Quenched Rails*. Carbide: CISP Ltd, 2016, 153 p.
- Shur E.A. *Povrezhdeniya rel'sov* [Rail damage]. Moscow: Intekst, 2012, 192 p. (In Russ.).
- Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels. *Steel Tech*. 2008, vol. 3, no. 1, pp. 19–23.
- Ivanisenko Yu., MacLaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite. *Acta Mater*. 2006, vol. 54, pp. 1659–1669.
- Ning Jiang-li, Courtois-Manara E., Kurmanaeva L., Ganeev A.V., Valiev R.Z., Kubel C., Ivanisenko Yu. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion. *Mater. Sci. and Eng.: A*. 2013, vol. 581, pp. 8–15.
- Gavriljuk V.G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation. *Mater. Sci. and Eng.: A*. 2003, vol. 345, no. 1-2, pp. 81–89.
- Li Y.J., Chai P., Bochers C., Westerkamp S., Goto S., Raabe D., Kirchheim R. Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite. *Acta Mater*. 2011, vol. 59, no. 10, pp. 3965–3977.
- Gavriljuk V.G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires. *Scripta Mater*. 2001, vol. 45, no. 12, pp. 1469–1472.
- Sheinman E. Rail wear. *Trenie i iznos*. 2012, vol. 33, no. 4, pp. 413–422. (In Russ.).
- Anisimov P.S. Influence of design and parameters of trolleys on wear of wheels and rails. *Zheleznodorozhnyi transport*. 1999, no. 6, pp. 38–42. (In Russ.).
- Gromov V.E., Yuriev A.A., Ivanov Yu.F. et al. Defect substructure change in 100-m differentially hardened rails in long-term operation. *Materials Letters*. 2017, vol. 209, pp. 224–227.
- Gromov V.E., Yuriev A.A., Peregudov O.A. et al. Physical nature of structure and properties degradation of rail surface after long term operation. *AIP Conference Proceedings*. 2017, vol. 1909, pp. 020066.
- Influence of rail wear and lubrication on interaction of vehicle-rail. *Zheleznye dorogi mira*. 2003, no. 9, pp. 66–70. (In Russ.).
- Ermakov V.M. Analysis of road performance in order to reduce “wheel-rail wear”. *Zheleznodorozhnyi transport*. 2005, no. 7, pp. 58–64. (In Russ.).
- Lysyuk V.S. On causes of cars coming-off and rail wear in curves. *Zheleznodorozhnyi transport*. 2004, no. 11, pp. 50–52. (In Russ.).
- Shapovalov V.V., Shcherbak P.N., Maiba I.A., Kostygov V.T. Methods of elimination of wheels and rails wear. *Zheleznodorozhnyi transport*. 2004, no. 3, pp. 111–115. (In Russ.).
- Grebe M. Ways to reduce wheel and rail wear. *Zheleznye dorogi mira*. 2002, no. 4, pp. 65–72. (In Russ.).
- Zhong W., Hu J.J., Shen P., Wang C.Y., Lius Q.Y. Experimental investigation between rolling contact fatigue and wear of high-speed and heavy-haul railway and selection of rail material. *Wear*. 2011, vol. 271, no. 9-10, pp. 2485–2493.
- Tyfour W.R., Beynon J.H., Kapoor A. The steady state wear behavior of pearlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions. *Wear*. 1995, vol. 180, no. 1-2, pp. 79–89.
- Singh U.P., Singh R. Wear investigation of wheel and rail steels under conditions of sliding and rolling-sliding contact with particular regard to microstructural parameters. *Wear*. 1993, vol. 170, no. 1, pp. 93–99.
- Defekty rel'sov. Klassifikatsiya, katalog i parametry defektnykh i ostrodefektnykh rel'sov*. OAO Rossiiskie zheleznye dorogi [Rail defects. Classification, catalog and parameters of cropped and defective rails. Russian Railway OJSC]. Moscow, 2014. (In Russ.).

Acknowledgements. The authors are grateful to A.M. Yunusov for help in experiments and results discussing.

Funding. The work was financially supported by RFBR grant (project No. 19-32-60001).

Information about the authors:

V.E. Kormyshev, *Cand. Sci. (Eng.), Engineer of the Chair of Science named after V.M. Finkel* (89239230000@mail.ru)

E.V. Polevoi, *Head of the Bureau of Metal Science and Thermal Treatment of the Technical Department of Rail Area*
(Egor.Polevoj@evraz.com)

A.A. Yur'ev, *Cand. Sci. (Eng.), Manager of Product and Resource Management* (ant-yurev@yandex.ru)

V.E. Gromov, *Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel* (gromov@physics.sibsiu.ru)

Yu.F. Ivanov, *Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Chief Researcher* (yuf55@mail.ru)

Received September 12, 2019

Revised October 23, 2019

Accepted November 15, 2019
