

УДК 669.17:669.046

ФРАГМЕНТАЦИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСОВ***Громов В.Е.¹**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики

им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Морозов К.В.¹, инженер, соискатель кафедры физики им. В.М. Финкеля**Юрьев А.Б.²**, д.т.н., управляющий директор**Перегудов О.А.²**, соискатель кафедры физики им. В.М. Финкеля¹ Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² ОАО «ЕВРАЗ» – объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат

(654049, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

Аннотация. Методами просвечивающей электронной микроскопии выполнен сравнительный послойный анализ структуры (по центральной оси и по выкружке) объемно и дифференцированно закаленных рельсов на расстояниях 0, 2 и 10 мм от поверхности катания. Показано, что независимо от направления исследования и расстояния исследуемого слоя от поверхности катания структура рельсов всех категорий представлена зернами перлита пластинчатой морфологии, зернами феррита, в объеме которых наблюдаются частицы цементита разнообразной формы (зерна феррито-карбидной смеси) и зернами структурно свободного феррита (зернами феррита, не содержащими в объеме частиц карбидной фазы, зернограничный феррит). Изучены морфология и дефектная субструктура выявленных фаз, установлены места локализации концентраторов напряжений. Представлены количественные зависимости параметров фрагментов зерен феррито-карбидной смеси рельсов от режимов термической обработки и расстояния от поверхности катания.

Ключевые слова: фрагменты, рельсы, угол разориентации, структура, объемная закалка, дифференцированная закалка, малоугловая граница, карбидная фаза, морфология.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-10-781-784

Эксплуатационная стойкость железнодорожных рельсов во многом определяется их структурно-фазовым состоянием, формируемым при термической обработке. Несмотря на ряд недостатков объемной закалки рельсов в масле эта технология термического упрочнения используется на металлургических предприятиях. Целесообразность дифференцированной закалки сжатым воздухом с прокатного нагрева, особенно для рельсов длиной 100 м, обусловлена экономическими соображениями. Возрастающие требования российских железных дорог по дифференцированной прочности по сечению рельсов и другим параметрам могут быть удовлетворены только при использовании технологии дифференцированной закалки. Для разработки режимов дифференцированной закалки, обеспечивающих требуемый уровень механических и эксплуатационных свойств, особенно для рельсов специальных категорий, необходим сравнительный анализ природы формирования и эволюции структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры при разных видах термической обработки [1 – 9].

Ранее в работах [10, 11] установлены количественные параметры дислокационной субструктуры,

внутренних полей напряжений и структурно-фазовых состояний, образовавшихся по диффузионному и сдвиговому механизмам $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в головке рельсов по центральной оси и по выкружке при закалке.

Целью настоящей работы, продолжающей цикл исследований [10, 11], является выявление количественных закономерностей изменения параметров фрагментации зеренной структуры рельсов, подвергнутых различным видам термической обработки.

В качестве материалов исследования использовали образцы рельсов длиной 25 м различных категорий, прошедших объемную закалку в масле при 850 °С с последующим отпуском при 460 °С (ГОСТ 51685 – 2000, 24182 – 80, 18267 – 82) и дифференцированно закаленных рельсов ДТ 350 длиной 100 м из стали Э76Ф.

Исследования зеренной структуры стали осуществляли методами металлографии травленого шлифа, фазового состава – методами рентгеноструктурного анализа [12, 13]. Исследования морфологии и дефектной субструктуры выявленных фаз, анализ внутренних полей напряжений, установление мест локализации концентраторов напряжений осуществляли методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг в слоях, расположенных на расстоянии 0, 2 и 10 мм от поверхности катания (рис. 1) [14, 15].

* Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект № 15 – 12000-10).

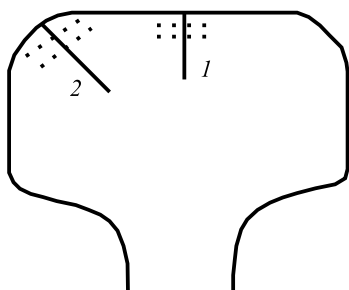


Рис. 1. Схема препарирования образца рельса при исследовании его структуры методами оптической и электронной дифракционной микроскопии:

— — направления по центральной оси (1) и по выкружке (2); --- — места расположения слоев металла, использованных для приготовления фольг

Fig. 1. Dissection circuit of the rail sample when studying its structure by the methods of optical and electron diffraction microscopy:

— — directions along the central axis (1) and along the filleted corner (2); --- — metal layers site, used for the preparation of foils

Установлено, что независимо от направления исследования и расстояния нахождения исследуемого слоя от поверхности катания (рис. 2) структура рельсов всех категорий представлена зернами перлита пластинчатой морфологии, зернами феррита, в объеме которых наблюдаются частицы цементита разнообразной формы (зерна феррито-карбидной смеси), и зернами структурно свободного феррита (зернами феррита, не содержащими в объеме частиц карбидной фазы, зернограничный феррит).

Относительное содержание структурных составляющих V(1), V(2) и V(3) (зерен перлита, феррито-карбидной смеси и структурно свободного феррита) объемно закаленных рельсов на расстоянии 2 мм (числитель) и 10 мм (знаменатель) представлено ниже.

Категория рельсов	Содержание структурных составляющих					
	По центральной оси			По выкружке		
	V(1)	V(2)	V(3)	V(1)	V(2)	V(3)
ИК	0,72	0,25	0,03	0,83	0,13	0,04
	0,69	0,27	0,04	0,73	0,23	0,04
	0,55	0,42	0,03	0,47	0,50	0,03
НЭ	0,74	0,21	0,05	0,61	0,36	0,03
	0,58	0,38	0,04	0,79	0,18	0,03
В	0,70	0,24	0,06	0,65	0,30	0,05

Пр и м е ч а н и е. Категория В – рельсы высшего качества с пониженным содержанием неметаллических включений; ИК – рельсы повышенной износостойкости; НЭ – рельсы низкотемпературной надежности.

Зерна феррито-карбидной смеси фрагментированы, то есть разбиты на области с небольшой разориентацией (рис. 2). По границам фрагментов располагаются частицы карбидной фазы пластинчатой или глобулярной формы. Размеры частиц изменяются в пределах 20 – 40 нм. Средние размеры фрагментов составляют

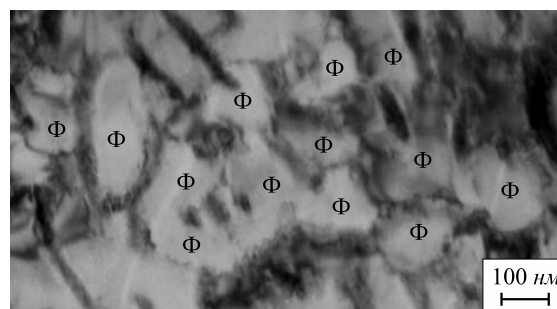


Рис. 2. Субструктура зерен феррито-карбидной смеси рельсов (Ф – фрагменты)

Fig. 2. Grain substructure of ferrite-carbide mixture of rails (Ф – fragments)

120 нм. Фрагменты разделены малоугловыми границами. Величина азимутальной составляющей полного угла разориентации фрагментов $\Delta\alpha$, определенная по представленной в работе [14] методике, изменяется в пределах 5,1 – 10,0° (рис. 3).

Средняя величина азимутальной составляющей полного угла разориентации фрагментов зерен феррито-карбидной смеси при использовании различных режимов дифференцированной закалки рельсов приведена ниже.

Режим	x, мм	$\Delta\alpha$, град.	
		по центральной оси	на выкружке
1	0	7,75	5,10
	2	5,50	7,20
	10	7,35	5,10
2	0	7,70	8,20
	2	9,60	9,70
	10	4,40	9,50
3	0	7,85	6,00
	2	5,40	10,70
	10	8,30	10,10

Усреднение по анализируемому объему образцов (объему слоя толщиной 10 мм) показывает, что величина угла $\Delta\alpha$ для рельсов, дифференцированно закаленных по режимам 1, 2 и 3, составляет 6,3, 7,4 и 8,1° (режимы дифференцированной закалки приведены в работах [10, 11]). Усредненные значения $\Delta\alpha$ для объемно закаленных рельсов различных категорий составляют примерно 7 – 8°.

Особняком в данной классификации стоят зерна феррито-карбидной смеси, характеризующиеся высоким уровнем разориентации элементов внутризеренной структуры (фрагментов) (рис. 4, а), на что указывает квазикольцевой характер микроэлектронограмм (рис. 4, б). Для этих зерен выполненные оценки показали, что $\Delta\alpha = 13^\circ$. Размеры фрагментов таких зерен изменяются в пределах 50 – 100 нм, размеры частиц кар-

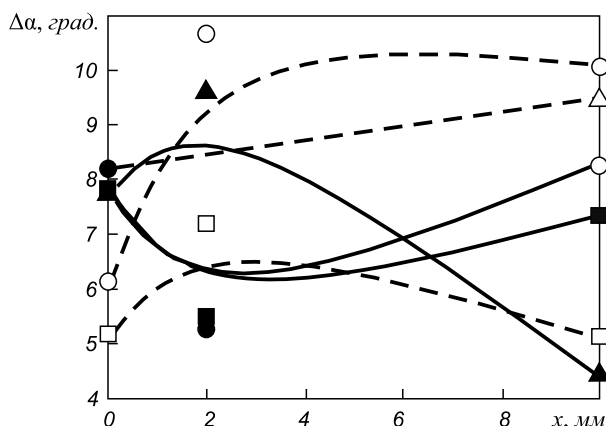


Рис. 3. Зависимость средней величины азимутальной составляющей полного угла разориентации ($\Delta\alpha$) фрагментов зерен феррито-карбидной смеси от расстояния (x) от поверхности катаия: \square , Δ и \circ – режим дифференцированной закалки 1, 2 и 3; темные и светлые точки – вдоль центральной оси и по выкружке

Fig. 3. Dependence of average quantity of the azimuth component of the full angle of disorientation ($\Delta\alpha$) of the grain fragments of ferrite-carbide mixture on the distance (x) from the roll surface: \square , Δ и \circ – the differentiated hardening mode 1, 2 and 3; dark and light spots – along the central axis and along the filleted corner

бидной фазы, имеющих округлую форму, – в пределах 10 – 30 нм (рис. 4, а). Относительное содержание таких зерен невелико, оно зависит от режима дифференцированной закалки и составляет для режимов 1 и 2 менее 1 %, для режима 3 – примерно 5 % объема материала, занятого зернами феррито-карбидной смеси.

Для объемно закаленных рельсов относительное содержание таких зерен не превышает 5 %.

Выводы. Методами просвечивающей электронной микроскопии исследована и проанализирована разориентация элементов внутризеренной структуры зерен феррито-карбидной смеси рельсов, подвергнутых объемной и дифференцированной закалке. Установлены зависимости азимутальной составляющей угла полной разориентации элементов субструктуры от расстояния от поверхности катаия по центральной оси и по выкружке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Микроструктура закаленных рельсов / В.Е. Громов, А.Б. Юрьев, К.В. Морозов, Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2014. – 213 с.
2. Железнодорожные рельсы из электростали / Н.А. Козырев, В.В. Павлов, Л.А. Годик, В.П. Дементьев. – Новокузнецк: ЕвразХолдинг, Новокузнецкий металлургический комбинат, 2006. – 388 с.

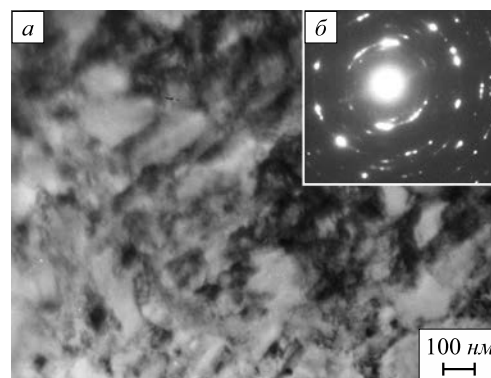


Рис. 4. Изображение зерен феррито-карбидной смеси (ПЭМ) в светлом поле (а) и микроэлектрондиограмма (б)

Fig. 4. Grain image of ferrite-carbide mixture (FCM) in the light field (а) and micro-electron-diffraction pattern (б)

3. Ворожищев В.И. Состав и технология производства рельсов повышенной работоспособности. – Новокузнецк: Новокузнецкий полиграфический комбинат, 2008. – 351 с.
4. Козырев Н.А., Яковлев П.Ю., Козырева О.А. Прогнозирование твердости и механических свойств в рельсовой стали Э76В // Изв. вузов. Черная металлургия. 1999. № 8. С. 37 – 39.
5. Браунштейн Е.Р., Царев В.Ф., Могильный В.В. и др. Рельсы из электростали // Путь и путевое хозяйство. 1997. № 6. С. 15.
6. Катунин А.И., Царев В.Ф., Пятайкин Е.М. и др. Улучшение качества железнодорожных рельсов из электростали // Металлург. 1998. № 7. С. 31, 32.
7. Грдина Ю.В. Достижения в области термической обработки рельсов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1967. № 10. С. 132 – 138.
8. Нестеров Д.К., Сапожков В.Е., Левченко Н.Ф. и др. Технология термообработки рельсов для работы в особо тяжелых условиях эксплуатации // Сталь. 1989. № 7. С. 79 – 82.
9. Павлов В.В., Корнева Л.В., Козырев Н.А. Выбор технологии для термического упрочнения железнодорожных рельсов // Сталь. 2007. № 3. С. 82 – 84.
10. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Волков К.В. и др. Формирование градиентов структуры, фазового состава и дефектной субструктуры в рельсах при дифференцированной закалке // Перспективные материалы. 2014. № 3. С. 40 – 45.
11. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Глезер А.М. и др. Дифференцированная закалка рельсов: структура, фазовый состав и дефектная субструктура поверхностного слоя // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 5. С. 42 – 46.
12. Schumann H. Metallographie. Leipzig: VEB, 1964. – 621 p.
13. Металлография сплавов железа: Справ. изд. / Н. Лямбер, Т. Греди, Л. Хабракен и др. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1985. – 248 с.
14. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в материаловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
15. Томас Г., Гориндж М.Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. – М.: Наука, 1983. – 320 с.

Поступила 1 июня 2015 г.

GRAIN STRUCTURE FRAGMENTATION OF QUENCHED RAILS

V.E. Gromov¹, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Physics named after V.M. Finkel

(gromov@physics.sibsiu.ru)

K.V. Morozov², Engineer, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Physics named after V.M. Finkel

A.B. Yur'ev², Dr. Sci. (Eng.), Managing Director

O.A. Peregudov², Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Physics named after V.M. Finkel

¹Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

²OJSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16, Kosmicheskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

Abstract. The comparative layer-by-layer analysis of the structure (along the central axis and filleted corner) of bulk and differentially quenched rails at a distance of 0, 2 and 10 mm from the roll surface has been done using the methods of transmission electron microscopy. It has been shown that regardless of the research guidelines and the distance of the researched layer from the roll surface the rail structure of all the categories is represented by the pearlite grains of plate-like morphology, ferrite grains, in the content of which one can observe the particles of cementite of various forms (the grains of ferrite-carbide mixture) and the grains of structurally free ferrite (ferrite grains, which do not contain grain-boundary ferrite in the bulk of the carbide phase particles). The morphology and defect substructure of the revealed phases has been studied, as well as established the localization of stress concentrators. The paper also presents the quantitative dependencies of fragment parameters of the grains of ferrite-carbide rail mixture on the thermal processing mode and the distance from the roll surface.

Keywords: fragments, rails, angle of disorientation, structure, bulk quenching, differentiated quenching, low-angle boundary, carbide phase, morphology.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-10-781-784

REFERENCES

- Gromov V.E., Yur'ev A.B., Morozov K.V., Ivanov Yu.F. *Mikrostruktura zakalennykh rel'sov* [Microstructure of quenched rails]. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2014. 213 p. (In Russ.).
- Kozyrev N.A., Pavlov V.V., Godik L.A., Dement'ev V.P. *Zheleznodorozhnye rel'sy iz elektrostali* [Electric steel rails]. Novokuznetsk: EvrazKholding, Novokuznetskii metallurgicheskii kombinat, 2008. 351 p. (In Russ.).
- Vorozhishchev V.I. *Sostav i tekhnologiya proizvodstva rel'sov povyshennoi rabotosposobnosti* [Composition and rail production engineering of the increased working capacity]. Novokuznetsk: Novokuznetskii poligraficheskii kombinat, 2008. 351 p. (In Russ.).
- Kozyrev N.A., Yakovlev P.Yu., Kozyreva O.A. Forecasting of solidity and mechanical properties in Э76В rail steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1999, no. 8, pp. 37–39. (In Russ.).
- Braunshstein E.R., Tsarev V.F., Mogil'nyi V.V., Kozyrev N.A., Dement'ev V.P. Electric steel rails. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 1997, no. 6, pp. 15. (In Russ.).
- Katunin A.I., Tsarev V.F., Pyataikin E.M., Kozyrev N.A., Kuznetsov E.P. Improving the quality of railroad rails made of steel produced in electric furnaces. *Metallurgist*. 1998, Vol. 42, no. 7–8, pp. 253–255.
- Grđina Yu.V. Achievements in the sphere of rail thermal treatment. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1967, no. 10, pp. 132–138. (In Russ.).
- Nesterov D.K., Sapozhkov V.E., Levchenko N.F. etc. Rail thermal treatment technology for operating in extra-heavy operating conditions. *Stal'*. 1989, no. 7, pp. 79–82. (In Russ.).
- Pavlov V.V., Korneva L.V., Kozyrev N.A. Selecting a thermal-hardening technology for rails. *Steel in Translation*. 2007, Vol. 37, no. 3, pp. 313–315.
- Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Volkov K.V., Morozov K.V., Konovalov S.V., Alsaraeva K.V. Formation of structure gradients, phase composition and defective substructure in rails at differentiated hardening. *Perspektivnye materialy*. 2014, no. 3, pp. 40–45. (In Russ.).
- Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Morozov K.V., Volkov K.V., Polevoi E.V. Rail differentiated hardening: structure, phase composition and defective substructure of a surface layer. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2014, no. 5, pp. 42–46. (In Russ.).
- Schumann H. *Metallographie*. Leipzig: VEB, 1964. 621 p.
- Lambert N., Greday T., Habraken L. etc. *De Ferri Metallographia. Vol. 4*. Düsseldorf, Verl. Stahleisen, 1983. (Russ. ed. *Metallografiya zheleza. Vol. 4*: Lambert N., Greday T., Habraken L. *Metallografiya splavov zheleza: Sprav. izd.* Moscow. Metallurgiya, 1985. 248 p.).
- Utevskii L.M. *Difraktsionnaya elektronnyaya mikroskopiya v metallovedenii* [Diffraction electron microscopy in physical metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 584 p. (In Russ.).
- Tomas G., Goringe M. J. *Transmission electron microscopy of materials*. New York-Chichester-Brisbane-Toronto, John Wiley Sons, 1979, 320 p. (Russ.ed.: Tomas G., Goringe M. *Prosvetichivayushchaya elektronnyaya mikroskopiya materialov*. Moscow: Nauka, 1983. 320 p.).

Acknowledgements. The research was performed with the support of RSF (project no.15 – 1200010).

Received June 1, 2015