

УДК 669.539.382:669.17

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ ПО СЕЧЕНИЮ ГОЛОВКИ РЕЛЬСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ*

В.Е. Кормышев¹, А.А. Юрьев², Ю.А. Рубанникова¹, К.В. Аксёнова¹

E-mail: 89239230000@mail.ru

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

²АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», Новокузнецк, Россия

Аннотация. Методами просвечивающей электронной микроскопии прослежено формирование структурно-фазовых состояний в головке 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов после длительной эксплуатации. Показано, что длительная эксплуатация сопровождается созданием градиентов структуры, фазового состава, дефектной субструктуры в головке рельсов, заключающихся в закономерном изменении содержания пластинчатого перлита, разрушенного перлита, феррито-карбидной смеси, скалярной и избыточной плотности дислокаций. По мере приближения к поверхности выкружки рельсов относительное содержание объема металла со структурой пластинчатого перлита снижается, а со структурой разрушенного перлита и феррито-карбидной смеси увеличивается. В феррито-карбидной смеси размер зерен и субзерен, формирующих данный тип структуры, изменяется в пределах 40 – 70 нм; размер частиц карбидной фазы, расположенных по границам зерен и субзерен, изменяется в пределах 8 – 20 нм.

Ключевые слова: градиент, структура, дефектная субструктура, дислокации, наноразмерный диапазон.

DISTRIBUTION OF STRUCTURE-PHASE STATES ALONG THE RAIL HEAD CROSS-SECTION DURING THEIR LONG-TERM PERFORMANCE

V.E. Kormyshev¹, A.A. Yuriev², Yu.A. Rubannikova¹, K.V. Aksenova¹

E-mail: 89239230000@mail.ru

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

²OJSC “EVRAZ – Consolidated West Siberian Metallurgical Plant” Novokuznetsk, Russia

Abstract. Methods of transmission electron microscopy detected the formation of structural-phase states in the head of the 100-meter differentially hardened rails after long-term performance. It is shown that long-term operation is accompanied by the creation of gradients in the structure, phase composition, defective substructure in the rail head, consisting in a regular change in the content of plate pearlite, fractured pearlite, ferrite-carbide mixture, scalar and excess dislocation density. As we approach the surface of the rail fillet, the relative content of the metal volume with the structure of plate pearlite decreases, and with the structure of the destroyed pearlite and ferrite-carbide mixture increases. In a ferrite-carbide mixture, the size of grains and subgrains forming this type of structure varies from 40 to 70 nm; the particle size of the carbide phase located at the grain boundaries and subgrains varies from 8 to 20 nm.

Keywords: gradients, structure, defective substructure, dislocations, nanoscale range.

Введение

Градиентными называются состояния, характерными особенностями которых являются зако-

номерно изменяющиеся в объеме изделия и (или) на их поверхности характеристики элементного и фазового составов, состояния дефектной субструктуры [1 – 3]. Градиентные структурно-фазовые состояния могут формироваться в материале в результате самоорганизации дефектной субструктуры, элементного и фазового составов,

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-32-60001.

инициированной различного вида внешними энергетическими воздействиями. К таким воздействиям относят: ионную имплантацию, механическое воздействие, ультразвуковую обработку; воздействие ударных волн, электронных пучков, плазменных потоков, СВЧ-излучение, лазерное воздействие и так далее [1 – 3]. При больших степенях деформации, реализуемых при равноканальном угловом прессовании, кручении при гидростатическом давлении в камере Бриджмена и всесторонней изотермической ковке, создаются градиентные структуры [4]. Деформационное поведение металлов при мегапластической деформации по своей природе очень близко к поведению рельсового металла при длительной эксплуатации [5, 6].

Общими механизмами формирования и эволюции структуры при мегапластической деформации перлитной стали являются: формирование нанометровых зерен феррита, деформационно-индуцированный распад пластин цементита под действием сдвиговых напряжений и последующее формирование наноразмерного цементита на дислокациях и границах нанозерен феррита за счет миграции атомов углерода преимущественно по ядрам дислокаций [7 – 14].

В головке объемно-закаленных 25-метровых рельсов после пропущенного тоннажа 500 и 1000 млн т по центральной оси и по выкружке формируется градиентный характер изменения размеров зерен пластинчатого перлита, феррито-карбидной смеси, межпластинчатого расстояния, скалярной и избыточной плотности дислокаций [7 – 14]. В работах зарубежных исследователей [15 – 18] отмечено, что подобные градиенты образуются уже при меньших значениях пропущенного тоннажа (150 – 300 млн т). Причиной формирования градиентов структурно-фазовых состояний являются различные процессы: релаксационные, рекристаллизационные, фазовые переходы, распад и образование фаз, аморфизация и др. [7 – 18]. В связи с этим установление характера распределения структуры, фазового состава и дефектной субструктуры по сечению головки рельсов при длительной эксплуатации является актуальным.

Целью настоящей работы является анализ формирования градиентов структурно-фазовых состояний в рельсовой стали, подвергнутой интенсивной пластической деформации путем экстремально длительной эксплуатации на железной дороге.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использованы дифференцированно закаленные 100-метровые рельсы категории ДТ350, изъятые из пути на Экспериментальном полигоне (г. Щербинка)

после пропущенного тоннажа 1411 млн т brutto. По химическому составу металл рельсовой пробы удовлетворяет требованиям ТУ 0921-276-01124323 – 2012 для рельсов категории ДТ350.

Проверочный химический состав рельсов категории ДТ350: 0,720 % С; 0,770 % Мn; 0,610 % Si; 0,010 % Р; 0,009 % S; 0,420 % Cr; 0,070 % Ni; 0,140 % Cu; 0,038 % V; 0,003 % Al; 0,003 % Ti (по массе).

Химический состав рельсов категории ДТ350 согласно требованиям ТУ 0921-276-01124323 – 2012: 0,710 – 0,820 % С; 0,750 – 1,250 % Мn; 0,250 – 0,600 % Si; не более 0,020 % Р; не более 0,020 % S; 0,200 – 0,800 % Cr; 0,200 % Ni; 0,200 % Cu (или суммарно Ni и Cu не более 0,270 %); 0,030 – 0,150 % V; не более 0,004 % Al; не более 0,025 % Ti (по массе).

Исследования структуры стали проводили методами оптической микроскопии (прибор Olympus GX51), сканирующей электронной микроскопии (прибор MIRA 3 Tescan) и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор ЭМ-125) [19 – 22]. Объекты исследования для просвечивающей электронной микроскопии (фольги толщиной 150 – 200 нм) изготавливали методами электролитического утонения пластинок, расположенных у поверхности и на расстоянии 2 и 10 мм от поверхности; пластинки вырезали методом электроискровой эрозии металла (рис. 1).

Результаты исследования и их обсуждение

Методами просвечивающей электронной микроскопии тонких фольг установлено, что структура исследуемой стали (независимо от расстояния исследуемого слоя до поверхности катания) представлена зернами перлита пластинчатой морфологии, зернами структурно-свободного феррита (зернами феррита, не содержащими в объеме частиц карбидной фазы) и

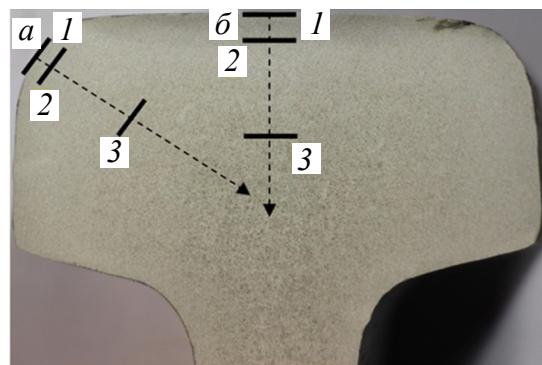


Рис. 1. Схема приготовления образца при изготовлении фольг методами ПЭМ:

а – выкружка; б – центральная ось; 1 – поверхность катания; 2 и 3 – слой на расстоянии 2 и 10 мм от поверхности

зернами феррита, в объеме которых наблюдаются частицы цементита (зерна феррито-карбидной смеси) преимущественно в виде коротких пластинок и частиц глобулярной формы. Как правило, объемы стали с частицами глобулярной формы и частицами в виде коротких пластинок наблюдаются раздельно, что позволило оценить их относительное содержание в материале 1:10.

Характерной особенностью феррито-карбидной смеси является наноразмерный диапазон формирующих ее зерен, субзерен, частиц цементита: для зерен и субзерен 40 – 70 нм; для частиц цементита, располагающихся по границам зерен и субзерен, 10 – 20 нм. Распределение содержания структурных составляющих рельсов (δ), скалярной ($\langle \rho \rangle$) и избыточной ($\rho_{изб}$) плотности дислокаций по сечению головки рельсов приведено на рис. 2. Длительная эксплуатация рельсов сопровождается (рис. 2, а) формированием градиента структурных составляющих, заключающимся в закономерном снижении по мере приближения к поверхности выкружки относительного содержания объема материала со структурой перлита пластинчатого и в увеличении относительного содержания объема материала со структурой разрушенного перлита и феррито-карбидной смеси.

Представленные на рис. 2, б результаты свидетельствуют о том, что скалярная плотность дислокаций рельсов увеличивается по мере приближения к поверхности выкружки. Наиболее интенсивно скалярная плотность дислокаций увеличивается в структуре пластинчатого перлита, наименее интенсивно – в структуре перлита выродившегося и перлита разрушенного.

Длительная эксплуатация рельсов сопровождается формированием в стали внутренних полей напряжений. При исследовании структуры стали методами просвечивающей электронной микроскопии наличие в материале полей напряжений проявляется в появлении на электронно-микроскопических изображениях изгибных контуров экстинкции [22], свидетельствующих о кривизне-кручении кристаллической решетки данного участка фольги.

Анализируя результаты, представленные на рис. 2, в, можно отметить, что наибольших значений величина избыточной плотности дислокаций достигает в структуре пластинчатого перлита, наименьших – в структуре феррито-карбидной смеси. При удалении от поверхности выкружки величина избыточной плотности дислокаций снижается, что свидетельствует об уменьшении амплитуды внутренних полей напряжений металла рельсов.

Установлено, что масштаб локализации внутренних полей напряжений материала рельсов закономерным образом зависит от расстояния от поверхности выкружки. Выявлено, что в слое стали, расположенном на глубине примерно 10 мм, внутренние поля напряжений локализованы в объеме перлитной колонии; источниками полей напряжений являются границы раздела колоний или зерен перлита. В слое, расположенном на расстоянии примерно 2 мм от поверхности выкружки, контуры экстинкции локализованы в объеме нескольких пластин феррита. В слое, формирующем поверхность выкружки, контуры экстинкции локализованы преимущественно в объеме отдельных пластин феррита. Это означает, что деформационное воздействие, имеющее место при длительной эксплуатации рельсов, приводит к формированию градиента объема локализации внутренних полей напряжений металла рельсов, а, следовательно, к существенному увеличению количества концентраторов напряжения, что, в свою очередь, будет способствовать повышению уровня охрупчивания и выходу рельсов из строя.

Выводы

По сечению головки дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов после длительной эксплуатации методами современного физического материаловедения установлены градиенты относительного содержания пластинчатого перлита, перлита разрушенного и феррито-карбидной смеси. По мере приближения к поверхности выкружки рельсов относительное содержание объема металла со структурой пластинчатого перлита снижается, а со структурой разрушенного перлита и феррито-карбидной смеси увеличивается.

Выявлено, что длительная эксплуатация рельсов сопровождается формированием градиента дефектной субструктуры материала, заключающимся в закономерном росте величины скалярной и избыточной плотности дислокаций. Установлено, что масштаб локализации внутренних полей напряжений рельсов закономерным образом зависит от расстояния от поверхности выкружки, изменяется от объема колонии перлита в целом на глубине примерно 10 мм до объема отдельных пластин феррита в поверхностном слое выкружки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов Э.В., Глезер А.М., Громов В.Е. Градиентные структурно фазовые состояния в твердых телах // Известия РАН. Серия Физическая. 2003. Т. 67. № 10. С. 1374 – 1375.

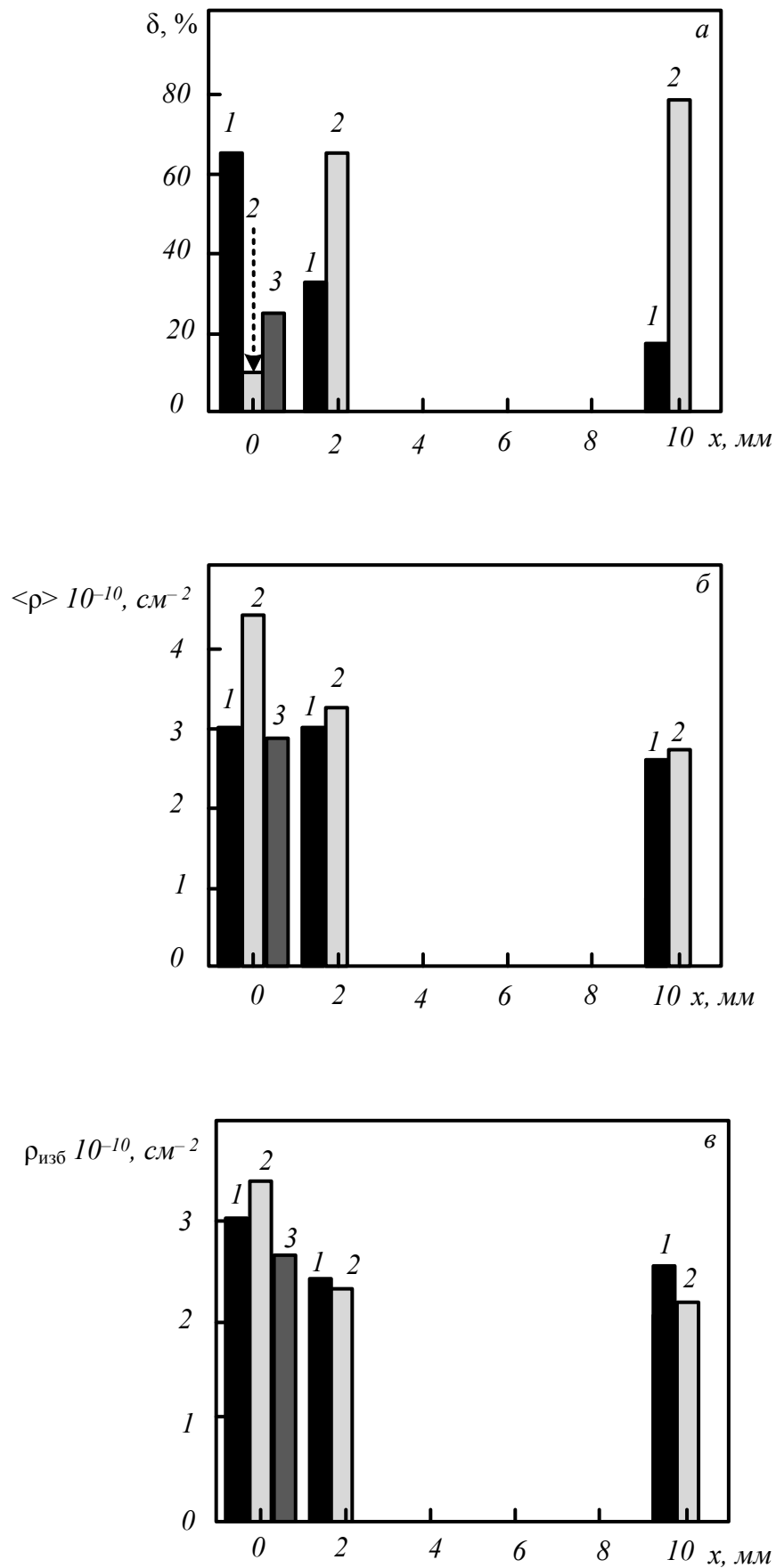


Рис. 2. Относительное содержание структурных составляющих рельсов (а), скалярная плотность дислокаций (б); избыточная плотность дислокаций (в):
 x – расстояние от поверхности; 1 – перлит выродившийся + перлит разрушенный; 2 – перлит пластинчатый;
 3 – феррито-карбидная смесь

2. Градиентные структурно-фазовые состояния в рельсовой стали / В.Е. Громов, В.А. Бердышев, Э.В. Козлов и др. – М.: Недра ком, ЛТД, 2000. – 176 с.
3. Градиентные структуры в перлитной стали / Э.В. Козлов, В.Е. Громов, В.В. Коваленко и др. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2004. – 224 с.
4. Глезер А.М. О природе сверхвысокой пластической (мегапластической) деформации // Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 7. № 12. С. 1767 – 1776.
5. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yuriev A.V., Morozov K.V. Microstructure of quenched rails. – Cambridge: CISP Ltd, 2016. – 153 p.
6. Мулюков Р.Р., Назаров А.А., Имаев Р.М. Деформационные методы наноструктурирования материалов: Предпосылки. История. Настоящее и перспективы // Известия вузов. Физика. 2008. № 5. С. 47 – 59.
7. Перегудов О.А., Морозов К.В., Громов В.Е., Глезер А.М., Иванов Ю.Ф. Формирование полей внутренних напряжений в рельсах при длительной эксплуатации // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 11. С. 34 – 37.
8. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Морозов К.В., Перегудов О.А., Алсараева К.В., Попова Н.А., Никоненко Е.Л. Изменение структуры и свойств поверхностных слоев головки рельсов после длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2015. Т. 12. № 2. С. 203 – 208.
9. Иванов Ю.Ф., Морозов К.В., Перегудов О.А., Громов В.Е., Попова Н.А., Никоненко Е.Л. Формирование структурно-фазовых градиентов в рельсах при длительной эксплуатации // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 3. С. 59 – 65.
10. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Морозов К.В., Перегудов О.А., Попова Н.А., Никоненко Е.Л. Механизмы упрочнения рельсов при длительной эксплуатации // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 4. С. 98 – 104.
11. Громов В.Е., Перегудов О.А., Иванов Ю.Ф., Морозов К.В., Алсараева К.В. Эволюция структуры и свойств поверхностного слоя рельсов при длительной эксплуатации // Вопросы материаловедения. 2015. № 3 (83). С. 30 – 38.
12. Морозов К.В., Громов В.Е., Перегудов О.А., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.Б., Аксёнова К.В. Формирование тонкой структуры рельсов при объемной и дифференцированной закалке // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2016. № 1. С. 53 – 61.
13. Иванов Ю.Ф., Морозов К.В., Перегудов О.А., Громов В.Е. Эксплуатация рельсовой стали: деградация структуры и свойств поверхностного слоя // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 8. С. 576 – 580.
14. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Глезер А.М., Перегудов О.А., Морозов К.В. Природа деградации структуры поверхности катания рельсов при эксплуатации // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80. № 12. С. 1682 – 1687.
15. Иванисенко Ю.В., Бауманн Г., Фехт Г. и др. Наноструктура и твердость «белого слоя» на поверхности железнодорожных рельсов // Физика металлов и материаловедение. 1997. Т. 83. № 3. С. 104 – 111.
16. 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.
17. Ivanisenko Yu., Maclaren I., Sauvage X., Valiev R. Z., Fecht H. J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite // Acta Materialia. 2006. Vol. 54. P. 1659 – 1669.
18. Ning J Jang-li, Courtois-Manara E., Kormanavaeva 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. 81 – 89.
19. Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. – Basel: Springer International Publishing, 2016. – 196 p.
20. Kumar C.S.S.R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. – New York: Springer, 2014. – 717 p.
21. Carter C.B., Williams D.B. Transmission Electron Microscopy. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.
22. Hirsch P., Hovy A., Nickolson R. et al. Electron microscopy of fine crystals. – М.: Mir, 1968. – 574 p.

© 2020 г. В.Е. Кормышев, А.А. Юрьев,
Ю.А. Рубанникова, К.В. Аксёнова
Поступила 8 июля 2020 г.