ТОНКАЯ СТРУКТУРА РЕЛЬСОВ ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

М.А. Порфирьев[1)], Ю.Ф. Иванов[2)], В.Е. Громов[1)], Ю.А. Шлярова[1)], Р.Е. Крюков[1)]
[1)]*Сибирский государственный индустриальный университет,*
ул. Кирова 42, Новокузнецк 654007, Россия, mporf372@gmail.com,
gromov@physics.sibsiu.ru, rubannikova96@mail.ru, rek_nzrmk@mail.ru
[2)]*Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия,*
пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия, yufi55@mail.ru

Методами просвечивающий электронной дифракционной микроскопии проведено исследование морфологии структуры и фазового состава, дифракционной субструктуры в головке дифференцированно закаленных рельсов специального назначения ДТ400ИК после длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 187 млн. тонн) на поверхности катания и расстоянии 10 мм от нее по центральной оси. Установлено, что при длительной эксплуатации рельсов из заэвтектоидной стали в слое, расположенном на глубине 10 мм формируется преимущественно структура перлита пластинчатой морфологии. Показано, что размеры зерен перлита изменяются в пределах от 1.5 мкм до 25 мкм. Установлено, что пластины цементита перлитных колоний фрагментированы, т.е. разделены на отдельные области, размеры которых изменяются в пределах (10-12) нм.

***Ключевые слова*:** рельсы; тонкая структура; скалярная плотность дислокаций; цементит; разрушение; эксплуатация.

FINE STRUCTURE OF HAEUTECTOID STEEL RAILS DURING OPERATION

M.A. Porfiriev[1)], Yu.F. Ivanov[2)], V.E. Gromov[1)], Yu.A. Shlyarova[1)], R.E. Kryukov[1)]
[1)]*Siberian State Industrial University, 42 Kirova Str., 654007 Novokuznetsk, Russia,*
moefimov@mail.ru, gromov@physics.sibsiu.ru, rubanniko-va96@mail.ru, i.r.i.ss@yandex.ru
[2)]*Institute of High-Current Electronics SB RAS,*
2/3 Akademicheskiy Ave., 634055 Tomsk, Russia, yufi55@mail.ru

Transmission electron diffraction microscopy was used to study the morphology of the structure and phase composition, the diffractive substructure in the head of differentially hardened special-purpose rails DT400IK after long-term operation (missed tonnage 187 million tons) on the tread surface and a distance of 10 mm from it along the central axis. It has been established that during long-term operation of hypereutectoid steel rails in a layer located at a depth of 10 mm, a pearlite structure of lamellar morphology is predominantly formed. It is shown that the size of pearlite grains varies from 1.5 μm to 25 μm. It has been established that the cementite plates of pearlite colonies are fragmented; are divided into separate regions, the sizes of which vary within (10-12) nm.

Keywords: rails; fine structure; scalar dislocation density; cementite; destruction; exploitation; defect structure.

Введение

В связи с наметившейся в последние годы тенденцией возрастания скоростей и интенсивности железнодорожного транспорта в разряд актуальных задач выходит создание рельсов с высокими эксплуатационными характеристиками. Решение этой проблемы в России осуществляется с 2013 года путем производства длинномерных дифференцированно закаленных рельсов. Совершенствование технологии их производства возможно лишь при глубоком анализе механизмов формирования структуры, фазового состава и свойств и их эволюции при длительной эксплуатации.

По информации РЖД до 75% изъятий рельсов происходит по причине износа и контактно-усталостным дефектам, которые возникают, в основном, в поверхностных слоях [1-3]. Эти процессы во многом определяются формированием и

эволюцией дислокационной субструктуры. Она играет важную роль в формировании предела прочности и текучести, деформационном упрочнении и разрушении материалов, при фазовых и структурных превращениях.

Целью настоящей работы является анализ формирования дислокационной субструктуры в поверхностных слоях рельсов из заэвтектоидной стали после длительной эксплуатации.

Материал и методика исследования

Материалом исследования являются образцы дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ400ИК из стали марки Э90ХАФ производства АО «Евраз-ЗСМК» после пропущенного тоннажа 187 млн. тонн брутто в процессе полигонных испытаний на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» (г. Щербенка). Элементный состав регламентирован ГОСТ 51685-2013 и ТУ 24.10.75111-298-057576.2017 РЖД. Морфологию структуры и фазового состава, дислокационную субструктуру определяли методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, прибор JEOL JEM2100F) [4]. Были выполнены исследования в головки рельсов вдоль центральной оси на расстояниях 0 и 10 мм от поверхности.

Результаты и их обсуждение

Структура стали на глубине 10 мм – перлит пластинчатой морфологии. Размеры зерен перлита изменяются в пределах от 1.5 мкм до 25 мкм. Существенно реже в исследуемой стали присутствуют зерна с глобулярными частицами цементита (глобулярный перлит) и зерна, в которых наряду с цементитом пластинчатой морфологии присутствуют частицы глобулярные. Пластины цементита фрагментированы, т.е. разделены на отдельные области, размеры которых изменяются в пределах (10-12) нм.

Наблюдаются зерна перлита с хаотически распределенными дислокациями и зерна перлита, дислокации в которых формируют сетчатую субструктуру. В первом случае скалярная плотность дислокаций составляет $\langle\rho\rangle = 3.3\cdot10^{10}$ см^2; во втором случае – $\langle\rho\rangle = 5.2\cdot10^{10}$ см^2.

Исследуемая сталь находится в упругонапряженном состоянии. Об этом свидетельствуют изгибные экстинкционные контуры, присутствующие на электронно-микроскопических изображениях структуры тонких фольг. Источниками кривизны-кручения кристаллической решетки являются границы раздела зерен перлита и пластины цементита перлитных колоний (рис. 1а). В пределах перлитной колонии изгибные контуры могут располагаться как поперек, так и вдоль пластин феррита, разделяющих соседние пластины цементита. Это свидетельствует о сложном упруго напряженном состоянии исследуемого материала. Источниками полей напряжений также могут являться торцы пластин цементита (рис. 1б).

Анализируя изображение структуры стали, приведенное на рис. 1б, можно отметить следующее. Во-первых, экстинкционный контур, прилегающий к торцу пластины цементита, имеет толщину 5.5 нм (рис. 1б, контур 1). Во-вторых, этот же контур, прилегающий к боковой грани пластины цементита, имеет толщину 17 нм, т.е. в ≈3 раза толще противоположного края контура. В-третьих, контур, замыкающийся на боковой грани пластины цементита (рис. 1б, контур 2), имеет среднюю толщину 11 нм, а контур, пересекающий пластину феррита, т.е. начинающийся и заканчивающийся на расположенных рядом пластинах цементита (рис. 1б, контур 3), имеет толщину ≈20 нм. Учитывая экспериментально установленные факты, свидетельствующие о том, что поперечные размеры (толщина) изгибного контура обратно пропорциональны кривизне-кручению кристаллической решетки материала (величине упругих напряжений материала) [1, 5], можно заключить, что наиболее напряженными участками перлитной структуры исследуемой стали являются торцы пластин цементита,

обрывающиеся в объеме перлитной колонии.

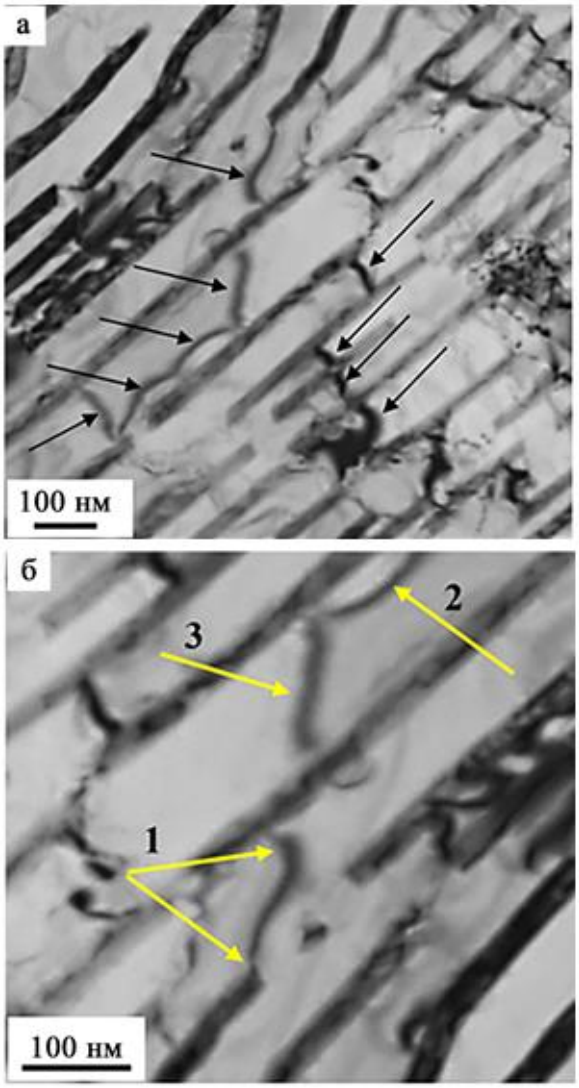

Рис. 1. Изгибные экстинкционные контуры (указаны стрелками), наблюдающиеся в структуре стали в слое на глубине 10 мм от поверхности катания.

Заключение

Установлено, что при длительной эксплуатации рельсов из заэвтектоидной стали в слое, расположенном на глубине 10 мм, формируется преимущественно структура перлита пластинчатой морфологии. Показано, что размеры зерен перлита изменяются в пределах от 1.5 мкм до 25 мкм. Установлено, что пластины цементита перлитных колоний фрагментированы, т.е. разделены на отдельные области, размеры которых изменяются в пределах (10-12) нм. Показано, что в пластинах феррита перлитных колоний присутствует дислокационная субструктура с хаотически распределенными дислокациями и дислокациями, формирующими сетки. В первом случае скалярная плотность дислокаций составляет $\langle\rho\rangle = 3{,}3\cdot10^{10}$ см$^{-2}$; во втором случае – $\langle\rho\rangle = 5{,}2\cdot10^{10}$ см$^{-2}$. Установлено, что исследуемая сталь находится в упруго-напряженном состоянии, о чем свидетельствуют изгибные экстинкционные контуры, присутствующие на электронно-микроскопических изображениях структуры тонких фольг.

Библиографические ссылки

1. Yuriev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation. Materials Research Forum LLC; 2021. 189 p.
2. Григорович К.В., Громов В.Е., Кузнецов Р.В., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. Формирование тонкой структуры перлитной стали при сверхдлительной пластической деформации. *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки* 2022; 503(1): 69-72.
3. Панин В.Е., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А., Громов В.Е., Панин С.В., Кормышев В.Е., Рубанников Ю.А. Эволюция тонкой структуры и свойств металла рельсов при длительной эксплуатации. *Физическая мезомеханика* 2020; 23(5): 85-94.
4. Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer International Publishing; 2016. 196 p.
5. Громов В.Е., Козлов Э.В., Базайкин В.И., Целлермаер В.Я., Иванов Ю.Ф. Физика и механика волочения и объемной штамповки. М.: Недра; 1997. 280 с.