Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

МЕТАЛЛУРГИЯ: ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО

«Металлургия – 2022»

Труды

XXIII Международной научно-практической конференции

23– 25 ноября 2022 г.

Часть 1

Новокузнецк
2022

ISSN 2542-1670

УДК 669(06)+658.012.056(06)
М 540

Редакционная коллегия
д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор С.В. Коновалов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., доцент Д.А. Чинахов,
к.т.н. Р.А. Шевченко, к.т.н., доцент О.А. Полях,
к.т.н. Е.Н. Темлянцева, д.т.н., доцент В.В. Зимин

М 540 Металлургия : технологии, инновации, качество : труды XXIII Международной научно-практической конференции. В 2 частях. Часть 1 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – 390 с. : ил.

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и практики металлургических процессов, технологий обработки материалов, автоматизации, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов металлургического производства.

Конференция проводится ежегодно.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

АДМИНИСТРАЦИЯ ПРАВИТЕЛЬСТВА КУЗБАССА

ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

АО «РУСАЛ-НОВОКУЗНЕЦК»

АО «КУЗНЕЦКИЕ ФЕРРОСПЛАВЫ»

АО «НЗРМК им. Н.Е. КРЮКОВА»

ЛЯОНИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ, Г. АНЬШАНЬ, КНР

ОАО «ЧЕРМЕТИНФОРМАЦИЯ»

ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ»

ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК СИБГИУ»

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ «КУЗБАСС»

АО «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК»

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2022

УДК 669.539.382:669.17:625.1

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ДЛИННОМЕРНЫХ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСОВ ПОСЛЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Кузнецов Р.В.[1], Юрьев А.А.[2], Шлярова Ю.А.[1], Громов В.Е.[1], Коновалов С.В.[1], Иванов Ю.Ф.[3]

[1]Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия, gromov@physics.sibsiu.ru
[2]АО «Евраз-объединеный ЗСМК», г. Новокузнецк, Россия, Ant-yurev@ yandex.ru
[3]Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия, yufi55@mail.ru

Аннотация. *Методами просвечивающей электронной микроскопии выполнены исследования структурно-фазовых состояний, дислокационной субструктуры, сформированных в сечении головки на расстояниях 0, 2, 10 мм от поверхности по радиусу скругления выкружки и по центральной оси 100-метровых дифференцированно-закаленных рельсов после экстремально длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж с 2013 г. 1770 млн. тонн брутто).*

Ключевые слова: *рельсы, длительная эксплуатация, дислокации, структура, фазовый состав.*

FORMATION OF STRUCTURAL-PHASE STATES AND FINE STRUCTURE OF LONG-DIMENSIONAL DIFFERENTIALLY HARDENED RAILS AFTER EXTREMELY LONG OPERATION

Kuznetsov R.V.[1], Yuriev A.A.[2], Shlyarova Yu.A.[1], Gromov V.E[1], Konovalov S.V.[1], Ivanov Yu.F.[3]

[1]Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, gromov@physics.sibsiu.ru
[2]JSC' Evraz-West-Siberian Metallurgical Combine', Novokuznetsk, Russia, Ant-yurev@ yandex.ru
[3]Institute of High-Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia, yufi55@mail.ru

Abstract. *Transmission electron microscopy was used to study the structural-phase states, dislocation substructure formed in the head section at distances of 0, 2, 10 mm from the surface along the fillet rounding radius and along the central axis of 100-meter differentially hardened rails after extremely long operation (missed tonnage since 2013 1770 million gross tons).*

Keywords: *rails, long-term operation, dislocations, structure, phase composition.*

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.

Целью является выявление физических механизмов упрочнения и установление закономерностей формирования структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры по центральной оси и радиусу скругления выкружки головки длинномерных рельсов после экстремально длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 1770 млн. тонн).

Материал и методы исследования

Материалом исследования являлись образцы дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ производства АО «Евраз ЗСМК» после пропущенного тоннажа 1770 млн. т брутто в процессе полигонных испытаний на Экспериментальном кольце АО «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (г. Щербинка). Исследование дефектной субструктуры, морфологии фаз и состояния карбидной фазы рельсов осуществляли методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Фольги для исследования изготавливали методами электролитического утонения пластинок, вырезанных электроискровым методом на расстоянии 2 мм, 10 мм и вблизи поверхности катания вдоль центральной оси и по рабочей выкружке.

Результаты и их обсуждение

Установлено, что независимо от направления исследований структура рельсов на глубине 10 мм и более после пропущенного тоннажа 1770 млн. тонн представлена зернами перлита преимущественно пластинчатой морфологии. Проведена количественная оценка параметров микроструктуры зерен перлита, проанализированы частотные распределения величины перлитных колоний и межпластинчатого расстояния в них вдоль центральной оси симметрии головки и радиуса скругления рабочей выкружки. Методами ПЭМ проведена классификация структурных состояний зерен перлита: зерна перлита пластинчатого с искривленными пластинами цементита; вырожденный перлит; зерна структурно свободного феррита [1].

Скалярная плотность хаотически распределенных дислокаций вдоль центральной оси составляет $\langle\rho\rangle = 2{,}9\cdot10^{10}$ см$^{-2}$, а вдоль радиуса скругления выкружки оси $\langle\rho\rangle = 3{,}5\cdot10^{10}$ см$^{-2}$. Выявлено присутствие изгибных контуров экстинкции, свидетельствующих о кривизне кручения фольги, указывающее на существование внутренних полей напряжений. Источниками полей напряжения являются границы раздела пластин цементита и феррита (рис. 1, а), частицы цементита в колониях вырожденного перлита и границы раздела

колоний перлита и перлитных зерен (рисунок 1, б) [2].

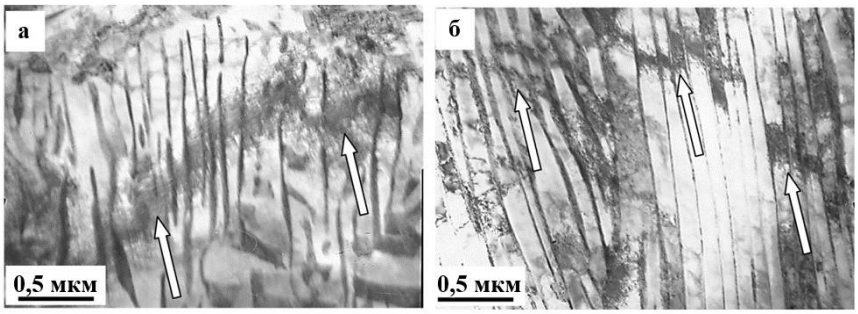
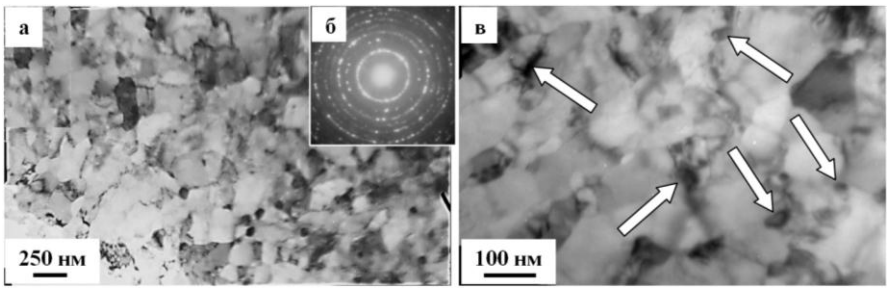


Рисунок 1 – Дефектная субструктура колоний перлита металла. Стрелками указаны изгибные экстинкционные контуры

Показано, что независимо от направления исследования в слое толщиной не менее 2,0 мм преобразование зерен и колоний пластинчатого перлита протекает следующим образом.

Во-первых, выявляются зерна, сохранившие структуру пластинчатого перлита с фрагментированными пластинами феррита. Во-вторых, наблюдаются колонии перлита, пластины цементита в которых разбиваются на отдельные фрагменты сдвинутые относительно друг друга. В-третьих, наблюдаются колонии перлита, пластины цементита в которых разделены на отдельные частицы карбида Fe округлой формы, декорирующие пластины феррита. Их размеры изменяются в пределах от 10 до 45 нм на поверхности и увеличиваются по мере удаления от поверхности катания на 2 мм до (80÷95) нм и (60÷75) нм соответственно, при измерении по центральной оси и радиусу выкружки. В-четвертых, области материала, имеющие поликристаллическую структуру, характерное изображение которой приведено на рисунке 2.



а, в – светлопольные изображения; б – микроэлектронограмма; стрелками на (в) указаны частицы карбидной фазы

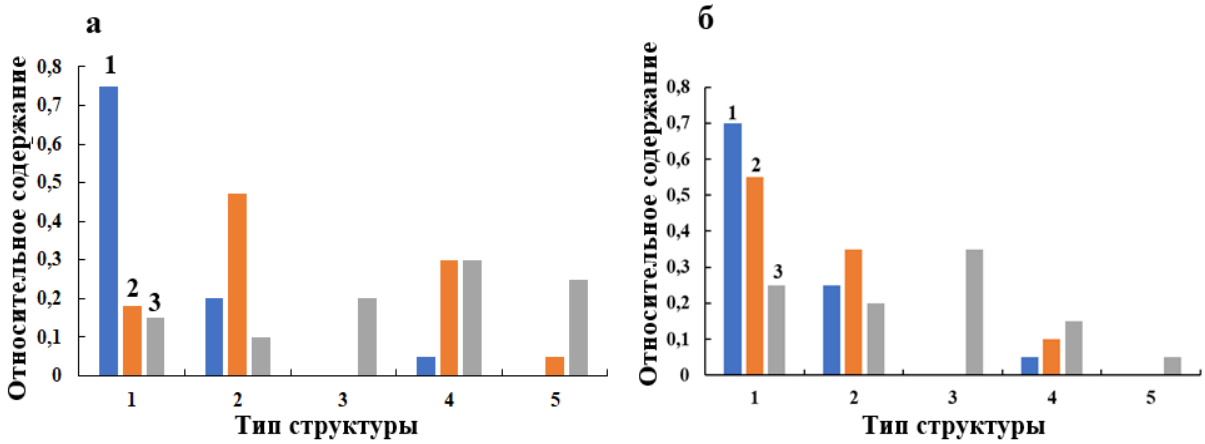
Рисунок 2 – Субмикрокристаллическая структура поверхности «рабочей выкружки»

Микроэлектронограмма, полученная с данной структуры, имеет кольцевое строение (рисунок 2, б). Последнее указывает на субмикро- наномасштабный размер кристаллитов. Количественный анализ такой структуры показывает, что размеры кристаллитов изменяются в пределах от 150 нм до 250 нм. Дифракционные кольца сформированы отдельно расположенными точечными рефлексами (рисунок 2, б). Такое строение колец свидетельствует о

большеугловой разориентации кристаллитов, т.е. о формировании именно зеренной структуры. На границах зерен феррита располагаются частицы карбидной фазы (рисунок 2, в, частицы указаны стрелками). Размеры частиц изменяются в пределах от 25 нм до 75 нм. Можно предположить, что данный тип структуры сформировался в результат динамической рекристаллизации стали, имеющей место при циклическом нагружении металла рельс в процессе сверхдлительной эксплуатации [3].

Количественный анализ, выполненный с использованием методов стереологии, позволил выявить относительное содержание указанных выше морфологических разновидностей структуры металла вдоль оси скругления рабочей выкружки. Полученные результаты представлены на рисунке 3.

Сопоставляя результаты, представленные на рисунках 3,а и 3,б можно отметить следующее. Во-первых, преобразование в процессе эксплуатации рельс структуры перлита пластинчатой морфологии относительно центральной оси протекает существенно меньшими темпами по сравнению с изменением структуры относительно радиуса скругления рабочей выкружки. Во-вторых, зеренно-субзеренная структура формируется исключительно в поверхностном слое металла рельс. В-третьих, относительное содержание зеренно-субзеренной структуры в поверхностном слое рабочей выкружки в 5 раз выше, чем в поверхностном слое поверхности катания. В совокупности указанные факты свидетельствуют о существенно более высоком уровне термо-деформационного преобразования металла рельс вдоль радиуса рабочей выкружки, по сравнению с металлом рельс вдоль центральной оси.



1 – относительное содержание типов структуры в слое, расположенном на глубине 10 мм; 2 – в слое, расположенном на глубине 2 мм; 3 – в поверхностном слое. Обозначены следующие типы структуры: 1 – перлит пластинчатой морфологии; 2 – перлит разрушенный; 3 – вырожденный перлит (феррито-карбидная смесь); 4 – зерна перлита, пластины феррита в которых декорированы наноразмерными частицами цементита; 5 – зерна феррита с субмикрокристаллической зеренно-субзеренной структурой

Рисунок 3 – Относительное содержание различных типов структуры головки рельсов вдоль радиуса скругления рабочей выкружки (а) и вдоль центральной оси (б)

Эксплуатация рельсов сопровождается деформационным преобразованием структуры перлита, одним из проявлений которого является разрушение и растворение пластин цементита. Выполненные оценки показали, что вне зависимости от направления исследования объемная доля цементита увеличивается от 4,5 % на поверхности до 10,4 % на глубине 10 мм при анализе вдоль центральной оси и от 3,1 % до 9,6 % вдоль радиуса скругления рабочей выкружки, соответственно (таблица 1) [4].

Таблица 1 – Количественные характеристики структуры рельсов после пропуска 1770 млн. тонн брутто

Параметры, средние по анализируемому слою	Поверхность катания			Рабочая выкружка		
	10 мм	2 мм	Поверхность	10 мм	2 мм	Поверхность
$\rho \cdot 10^{-10}$, см$^{-2}$	2,89	3,81	4,43	3,47	3,46	4,23
$\rho_{\pm} \cdot 10^{-10}$, см$^{-2}$	1,65	1,92	3,12	1,87	2,70	3,84
Объемная доля Fe_3C	10,4 %	8,2 %	4,5 %	9,6 %	3,6 %	3,1 %
Доля углерода	0,74 %	0,59 %	0,32 %	0,69 %	0,26 %	0,22 %

Согласно литературным данным оценку количества атомов углерода, формирующих карбид железа Fe_3C проводили,используя выражение $\Delta C = Fe_3C = 0{,}07\ \Delta V$, где ΔV – объемная доля частиц карбидной фазы.

Выполненные таким образом оценки показывают, что концентрация углерода в слое на глубине 2 мм равна 0,26 % масс., а в поверхностном слое выкружки составляет 0,22 % масс. Для центральной оси симметрии эти значения составляют 0,59 % масс. и 0,32 % масс., соответственно.

Выявленная потеря углерода может быть обусловлена как обезуглероживанием поверхностного слоя металла рельсов в процессе сверхдлительной эксплуатации, так и выходом атомов углерода на дефекты структуры стали – линии дислокаций, границы зерен и субзерен, т.е. реализацией процесса динамического старения стали. Взаимодействие дислокаций с атомами внедрения приводит к закреплению дислокаций, препятствующему их дальнейшему движению, способствуя существенному упрочнению материала, приводя, в конечном итоге, к его охрупчиванию. Факт охрупчивания поверхностного слоя металла проявляется в формировании множественных микро- и макротрещин в головке рельсов.

Заключение

Экстремально длительная эксплуатация длинномерных дифференцированно закаленных рельсов сопровождается значительным преобразованием структурно-фазовых состояний и тонкой субструктуры головки рельсов. Методами просвечивающей электронной микроскопии выявлены количественные закономерности изменения параметров на расстояниях 0, 2, 10 мм от поверхности по радиусу скругления выкружки и по центральной оси.

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

Библиографический список

1. Юрьев А.А., Кузнецов Р.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. Длинномерные рельсы: структура и свойства после сверхдлительной эксплуатации: Монография. – Новокузнецк: Полиграфист, 2022. – 311 с.

2. Кузнецов Р.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Рубанникова Ю.А., Кормышев В.Е., Юрьев А.А., Попова Н.А. Структурно-фазовое состояние и упрочнение рельсов после экстремально длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18. № 3. С. 328–337.

3. Кузнецов Р.В., Перегудов О.А., Шляров В.В. Перераспределение атомов углерода в рельсах при сверхдлительной эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2022. Т.65. № 2. С. 134–136.

4. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Кузнецов Р.В., Шлярова Ю.А., Юрьев А.А., Кормышев В.Е. Структура рельсов после экстремально длительной эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Физика. 2022. № 3. С. 160–165.

УДК 658.511:621.771

СИНТЕЗ КОМПЛЕКСНОЙ НОРМАТИВНОЙ МОДЕЛИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАРТИИ ПРОКАТНОЙ ПРОДУКЦИИ

Мусатова А.И., Кулаков С.М., Фастыковский А.Р.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация*: Для рационального планирования и прогнозирования сроков производства необходимо нормирование продолжительности циклов выпуска продукции. Длительность изготовления партий продукции – основа построения оперативных планов-графиков. Рассматривается задача многовариантного оценивания длительности изготовления партий прокатной продукции с учетом изменяющихся производственных ситуаций. Ситуационное обоснование нормативной длительности производственных циклов на основе разработанной процедуры позволяет руководству цеха выбрать рациональные ситуации и режимы работы оборудования при планировании, прогнозировании и оперативном управлении для эффективной реализации заказов «точно в срок».*

Ключевые слова*: длительность изготовления партий продукции, такты работы оборудования, ситуационные модели, подсистемы, системы.*

SYNTHESIS OF A COMPLEX NORMATIVE MODEL OF THE DURATION OF MANUFACTURING A BATCH OF ROLLED PRODUCTS

Musatova A.I., Kulakov S.M., Fastykovsky A.R.