



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 669.539.392:669.17:548.571:548.4

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.024

EDN: YPKKNK

РАЗРУШЕНИЕ ПЛАСТИНЧАТОГО ПЕРЛИТА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ РЕЛЬСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Юрий Федорович Иванов ¹, Виктор Евгеньевич Громов ^{2*},
Михаил Анатольевич Порфирьев ³, Роман Евгеньевич Крюков ⁴,
Виталий Владиславович Шляров ⁵

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

^{2, 3, 4, 5} Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

¹ yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

^{2*} gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

³ mporf372@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5739>

⁴ rek_nzrmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3394-7941>

⁵ shlyarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>

Аннотация. Методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) выполнен анализ структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры поверхностных слоев рельсов категории ДТ400, изготовленных из электростали Э90ХАВ, после испытаний на экспериментальном кольце РЖД в г. Щербинке (пропущенный тоннаж 187 млн. тонн брутто). Анализ проведен на глубине до 2 мм по радиусу скругления выкружки. Структура рельсовой стали представлена преимущественно зернами пластинчатого перлита, в феррите которого наблюдается дислокационная субструктура, сформированная хаотически распределенными дислокациями и сетками. Выявлено формирование изгибных контуров экстинкции и выявлены источники кривизны–кручения кристаллической решетки. Средние поперечные размеры экстинкционных контуров достигают минимальных значений на глубине 2 мм. Установлена зависимость скалярной плотности дислокаций от расстояния до поверхности выкружки головки рельса. На расстоянии 2 мм от поверхности скалярная плотность максимальна. Показано, что в процессе эксплуатации происходит трансформация перлитной структуры, заключающаяся в разрезании пластин цементита движущимися дислокациями и вытягивание атомов углерода из цементита в ферритную матрицу.

Ключевые слова: разрушение цементита, поверхность, рельсы, экстинкционные контуры, дислокации, эксплуатация, электронная микроскопия.

Благодарности: Авторы признательны Н. А. Поповой за обсуждение результатов экспериментов и Е. В. Полевому за предоставленные образцы.

Для цитирования: Разрушение пластинчатого перлита в поверхности катания рельсов при длительной эксплуатации / Ю. Ф. Иванов [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 4, С. 191–198. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.024. EDN: <https://elibrary.ru/YPKKNK>.

Original article

FRACTURE OF LAMELLAR PEARLITE IN THE TRED SURFACE OF RAILS DURING LONG-TERM OPERATION

Yurii F. Ivanov ¹, Victor E. Gromov ^{2*}, Michael A. Porfiriev ³,
Roman E. Kryukov ⁴, Vitaly V. Shlyarov ⁵

¹ Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

^{2, 3, 4, 5} Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

© Иванов Ю. Ф., Громов В. Е., Порфирьев М. А., Крюков Р. Е., Шляров В. В., 2023

¹ yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

² gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

³ mporf372@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5739>

⁴ rek_nzrmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3394-7941>

⁶ shlyarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>

Abstract. Using the methods of transmission electron diffraction microscopy, the structure, phase composition, dislocation substructure in surface layers up to 2 mm deep from the surface of the fillet of differentially hardened special-purpose rails made of E90KhAF steel were analyzed after a missed tonnage of 187 million gross tons. The structure of rail steel is represented mainly by grains of lamellar perlite, in the ferrite of which a dislocation substructure is observed, formed by randomly distributed dislocations and networks. The formation of bending contours of extinction has been established and the sources of curvature-torsion of the crystal lattice have been identified. The average transverse dimensions of the extinction contours reach their minimum values at a depth of 2 mm. It is shown that the scalar density of dislocations of the studied steel increases as it approaches the surface of the rail fillet, reaching a maximum value at a distance of 2 mm from the surface. The mechanisms of destruction of cementite plates (cutting by moving dislocations and dissolution in place) and the precipitation of nanosized particles of the carbide phase are considered.

Keywords: destruction of cementite, surface, rails, extinction contours, dislocations, exploitation, electron microscopy.

Acknowledgements: The authors are grateful to N.A. Popova for discussion of the experimental results and E.V. Plevomu for the provided samples.

For citation: Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Porfiriev, M. A., Kryukov, R. E. & Shlyarov, V. V. (2023). Fracture of lamellar pearlite in the surface layers of railhead during long-term operation. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 191-198. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.024. EDN: <https://elibrary.ru/YPKKNK>.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений в физике сталей является выявление природы деградации механических свойств рельсового металла при длительной эксплуатации [1]. Проблема поведения рельсов при эксплуатации имеет фундаментальный интерес и практическую значимость. Это связано с тем, что в последние годы резко возросли нагрузки на ось и скорости движения железнодорожного транспорта. При эксплуатации рельсов в поверхностных слоях протекают сложные релаксационные, рекристаллизационные процессы, приводящие к ухудшению механических свойств и выходу рельсов [2–7].

Повышенный интерес к изучению механизмов распада цементита в холоднодеформированных перлитных сталях начался с 60-х годов прошлого столетия в связи с потребностями производства в высокопрочной проволоке и открывшимися возможностями просвечивающей электронной микроскопии [8]. Применительно к рельсовой тематике распад цементита ожидаем при длительной эксплуатации рельсов и образовании «белого слоя» [1, 6], способного привести к возникновению микротрещин. Гипотезы о чрезвычайно высокой твердости «белого слоя» базируются на его мартенситной природе и измельчении

феррито-перлитной структуры до наноразмерного диапазона зерен, в которой растворяется цементит [9–12].

В наших работах [1, 13, 14] прослежено протекание процесса распада цементита и перераспределения атомов углерода по сечению головки рельсов по разным направлениям. Показано, что выкружка головки рельсов является потенциальным местом зарождения очагов разрушения. Это связано с тем, что процессы обезуглероживания поверхностного слоя и выход атомов углерода на дефекты структуры более развиты на поверхности выкружки по сравнению с поверхностью катания.

4 года назад в России начато производство нового вида продукции – рельсов из заэвтектоидной стали категории ДТ400ИК. Это рельсы повышенной износостойкости и контактной выносливости. Для совершенствования технологии производства и формирования высоких механических свойств таких рельсов необходимы знания эволюции структуры, фазового состава, дефектной субструктуры в головке рельсов после длительной эксплуатации. Для рельсов общего назначения категории ДТ350 в работах [1, 7, 13, 14] такие закономерности были выявлены. В связи с вышеизложенным, в настоящей работе выполнен анализ трансформации

РАЗРУШЕНИЕ ПЛАСТИНЧАТОГО ПЕРЛИТА В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ГОЛОВКИ РЕЛЬСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

пластинчатого перлита на разном расстоянии от поверхности выкружки для рельсов категории ДТ400ИК.

МЕТОДЫ

Объектом исследования были образцы рельсов категории ДТ400ИК из электростали марки Э90ХАФ после испытаний на кольце РЖД (г. Щербинка). Пропущенный тоннаж составлял 187 млн. тонн брутто. Элементный состав соответствовал ГОСТ 51685-213 и техническим условиям РЖД ТУ 24.10.75111-298-057576.2017. Структурно-фазовые состояния и дефектная субструктура рельсов определялись методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, прибор JEOL JEM21100F) [15–17]. Скалярная плотность дислокаций определялась по методике, приведенной в [1, 18]. Фольги для исследования

Таблица 1 – Зависимость параметров тонкой структуры рельсов от расстояния от поверхности выкружки

Table 1 – Dependence of the fine structure parameters rails on distance from the fillet surface

Расстояние от поверхности	$\langle \rho \rangle, 10^{10} \text{ см}^{-2}$	D, мкм	d, нм	H ₁ , нм	H ₂ , нм	$\frac{1}{\delta_1, \text{ мкм}^2}$	$\frac{1}{\delta_2, \text{ мкм}^2}$
0	4,5	3,5	30	175	14	0,09	1,0
2	5,4	3,0	47	150	12,5	0,11	0,08

$\langle \rho \rangle$ – скалярная плотность дислокаций, D – продольный размер фрагментов ферритных пластин, d – продольные размеры фрагментов цементитных пластин, H₁ и H₂ – поперечные размеры изгибных контуров 1 и 2 типа, δ_1 и δ_2 – удельная плотность контуров.

Характерной особенностью ПЭМ изображений структуры является наличие экстинкционных контуров, свидетельствующих о кривизне – кручении решетки [1, 7, 13, 14]. Они наблюдаются в ферритных и цементитных пластинах. В ферритных пластинах контуры могут распространяться во всем зерне перлита от одной до другой его границы. В этом случае границы раздела зерен или колоний перлита являются источниками кривизны – кручения решетки. В ряде случаев контуры располагаются в отдельно взятой пластине феррита. Их источниками в данном случае будут являться границы раздела фаз: феррита и цементита. Из таблицы 1 следует, что поперечные размеры контуров минимальны на расстоянии 2 мм от поверхности выкружки. Так как величина внутренних напряжений обратно пропорциональна величине поперечных размеров контуров [1, 7, 13, 14], то можно считать, что этот подповерхностный слой (2 мм) металла является наиболее напряженным.

Межфазная граница раздела феррит–цементит является максимально напряжен-

готовились на расстояниях 0 и 2 мм от поверхности по радиусу скругления выкружки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Структура рельсовой стали представлена преимущественно зернами пластинчатого перлита. В ферритной составляющей перлита выявлена хаотическая и сетчатая дислокационная субструктура. Значения скалярной плотности дислокаций представлены в таблице 1. Установлено, что пластины феррита и цементита фрагментированы. Поперечные размеры фрагментов феррита не зависят от расстояния до поверхности выкружки, тогда как продольные значения растут по мере удаления от поверхности. Аналогичным образом ведут себя продольные размеры фрагментов пластин цементита.

Об этом свидетельствует факт высокой плотности концентраторов напряжений у межфазных границ. У этих же границ амплитуда напряжений на порядок выше амплитуды напряжений у внутрифазных границ. Пластины цементита более прочные, чем пластины феррита и контуры экстинкции встречаются в них значительно реже. Их поперечные размеры находятся в пределах (8–13) нм и не зависят от расстояния от поверхности выкружки. В работах [1, 8, 19–21] отмечено, что пластинчатый перлит разрушается при деформации. Основными механизмами разрушения являются: перерезание цементитных пластин движущимися дислокациями; вытягивание атомов углерода из цементита на дислокации. Причиной второго механизма является значительная разница энергии связи атомов углерода с дислокациями (0,6 эВ) и с атомами железа в цементите (0,4 эВ). Протекание этих механизмов зависит от типов дислокационной субструктуры и плотности дислокаций.

Характерное изображение формирующей структуры при длительной эксплуата-

ции представлено на рис. 1, а. Отчетливо видно опутывание пластин цементита дислокациями, в результате чего размывается контраст на межфазной границе, разделяющей пластины цементита и феррита. На микроэлектроннограмме (рис. 1, б), полученной с такого участка фольги, наблюдается азимутальное искажение рефлексов и феррита, и цементита, что свидетельствует о формировании разориентированной субструктуры.

Вынос атомов углерода в объем ферритных пластин сопровождается формированием новых наноразмерных глобулярных частиц цементита с размерами (5–8) нм (рис. 2). Это третичный цементит. На рисунке 3 представлено ПЭМ изображение структуры при реализации механизма разрезания пластин. При этом изменяются лишь линейные размеры цементита и его морфология. Фазовый состав цементита при этом не изменяется. Об этом свидетельствует анализ микроэлектроннограмм (рис. 2 и рис. 3). При вытягивании атомов углерода из карбидной фазы цементитные пластины первоначально опутываются дислокациями. В дальнейшем они разбиваются на слабоориентированные фрагменты. Новые фазы также не обнаруживаются.

В работах украинских металлофизиков отмечено, что этот процесс может происходить путем диффузии атомов по междоузлиям,

по деформационным вакансиям и по ядрам дислокаций [8]. Протекание этих механизмов зависит от ряда факторов, в частности условия деформирования, степени легирования стали и т. д. [1, 19, 20]. По мнению школы академика В.Е. Панина, в рамках физической мезомеханики такой механизм может быть представлен как наномасштабные мезоскопические структурные состояния [21–23]. Используя представления о ротационных модах пластической деформации и локальной кривизне решетки, авторы считают вероятным такой облегченный процесс перемещения атомов углерода. При этом несплошности типа микротрещин образовываться не будут.

Рост плотности дислокаций, других дефектов с увеличением пропущенного тоннажа может привести к формированию критического значения плотности дефектов и завершиться зарождением микротрещин, способных вывести рельсы из строя [24]. Анализ рисунков 1–3 и таблицы 1 свидетельствует, что на расстоянии 2 мм от поверхности выкружки основным механизмом разрушения цементитных пластин является вынос атомов углерода с последующим формированием новых частиц карбида железа. В поверхностном слое реализуются оба механизма трансформации цементита: разрушения движущимися дислокациями и вынос атомов углерода.

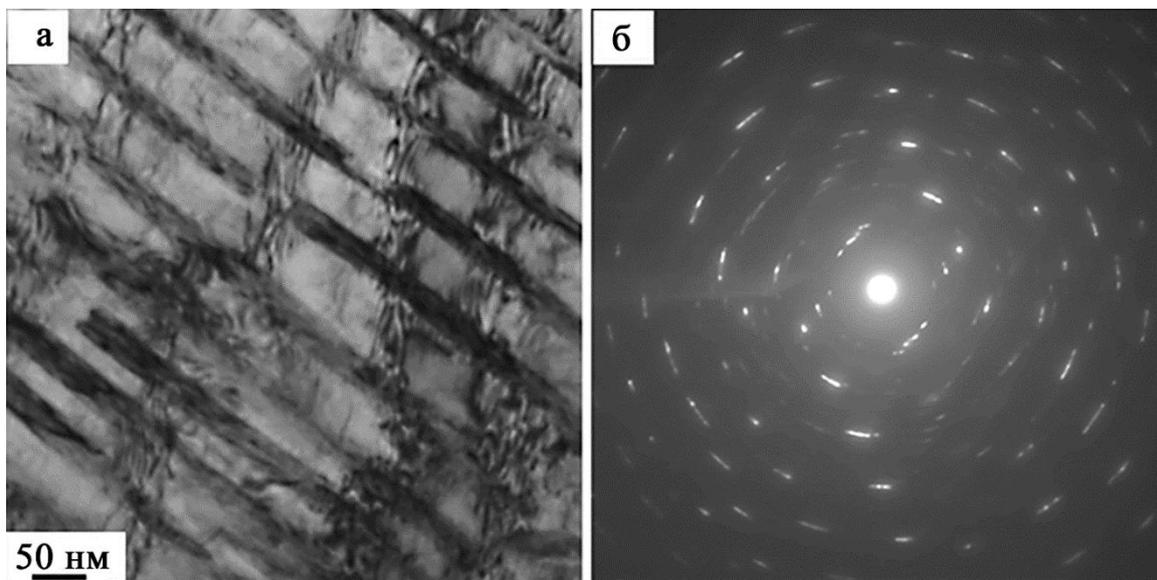


Рисунок 1 – ПЭМ изображение структуры рельсовой стали в слое на глубине 2 мм; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма к (а)

Figure 1 – TEM images of the structure of rail steel in a layer at a depth of 2 mm; a – bright field; b – microelectron diffraction pattern to (a)

РАЗРУШЕНИЕ ПЛАСТИНЧАТОГО ПЕРЛИТА В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ГОЛОВКИ
РЕЛЬСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

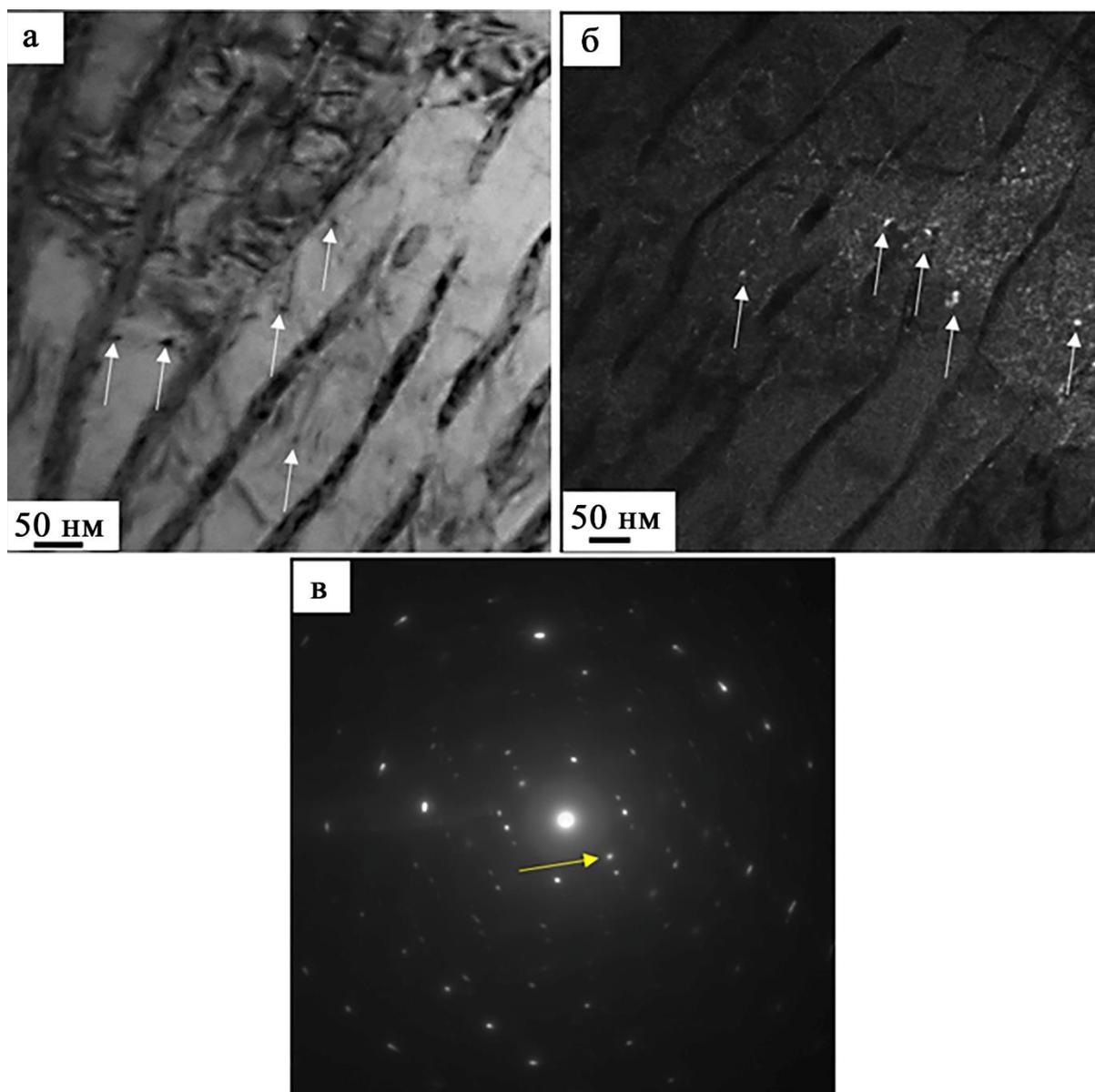


Рисунок 2 – ПЭМ изображения структуры слоя рельсовой стали, расположенного на глубине 2 мм; а – светлое поле; б – темное поле, полученное в совпадающих рефлексах $[110]\alpha\text{-Fe}$ и $[031]\text{Fe}_3\text{C}$; в – микроэлектроннограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле). На (а) и (б) стрелками указаны частицы третичного цементита

Figure 2 – TEM images of the structure of the rail steel layer located at a depth of 2 mm; a – bright field; b – dark field obtained in coinciding reflections of $[110]\alpha\text{-Fe}$ and $[031]\text{Fe}_3\text{C}$; (c) microelectron diffraction pattern (the arrow indicates the reflection in which the dark field was obtained). Arrows in (a) and (b) indicate particles of tertiary cementite

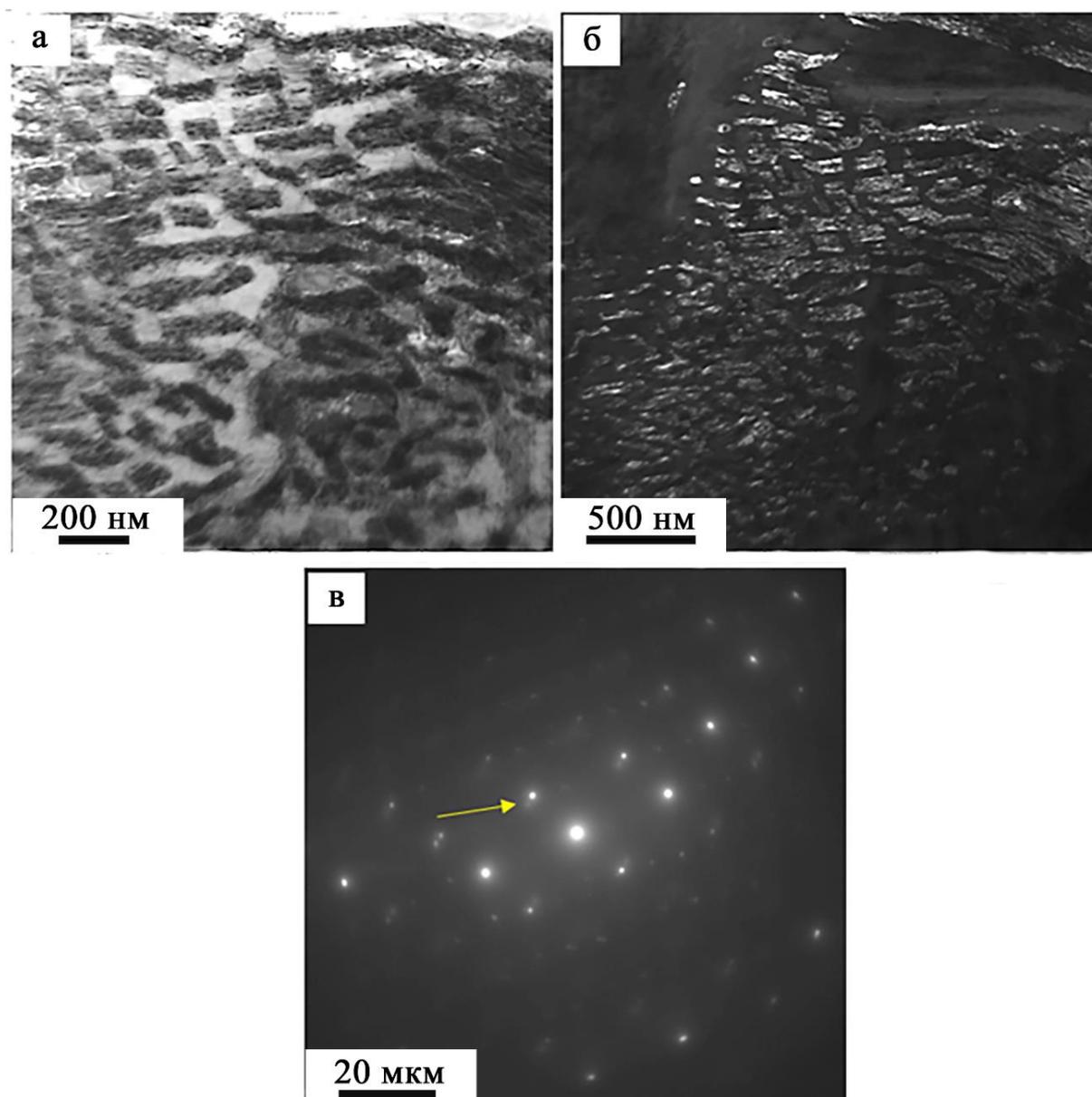


Рисунок 3 – ПЭМ изображения структуры поверхности выкружки; а – светлое поле; б – темное поле, полученное в совпадающих рефлексах $[110]\alpha\text{-Fe}$ и $[211]\text{Fe}_3\text{C}$; в – микроэлектроннограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле)

Figure 3 – TEM images of the structure of the fillet surface; a - bright field; b – dark field obtained in coinciding reflections of $[110]\alpha\text{-Fe}$ and $[211]\text{Fe}_3\text{C}$; c – microelectron diffraction pattern (the arrow indicates the reflection in which the dark field was obtained)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы структура, фазовый состав и дефектная субструктура поверхности выкружки рельсов категории ДТ400ИК после пропущенного тоннажа 187 млн. тонн. Представлены основные механизмы разрушения пластин цементита: разрезание дислокациями и вынос атомов углерода из цементита и проведено сравнение с известными литературными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Structure and properties of lengthy rails after extreme long-term operation / A.A. Yuriev [et al.] Millersville, PA, USA: Materials Research Forum LLC, 2021.
2. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite / Yu. Ivanisenko [et al.] // Acta Materialia. 2006. V. 54. P. 1659–1669. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.11.034>.
3. The mechanical properties of the nanocrystalline layer on the surface of railway tracks / W. Lojowski [et al.] // Materials Science and

РАЗРУШЕНИЕ ПЛАСТИНЧАТОГО ПЕРЛИТА В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ГОЛОВКИ РЕЛЬСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Engineering: A. 2003. V. 303. № 1–2. P. 209–215. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01948-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01948-1).

4. Nanostructure formation on the surface of railway tracks / W. Lojkowski [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. 2001. V. 303. P. 197–208.

5. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels: effect of high strain rate deformation // *Steel Tech*. 2008. V. 3. № 1. P. 19–23.

6. Takahashi J., Kawakami K., Ueda M. Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a railtrack surface // *Acta Materialia*. 2010. V. 58. P. 3602–3612. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.030>.

7. Деформационное преобразование структуры и фазового состава поверхности рельсов при сверхдлительной эксплуатации / В.Е. Громов [и др.] // *Деформация и разрушение материалов*. 2022. № 1. С. 35–39. DOI: 10.31044/1814-4632-2022-1-35-39.

8. Gavrilyuk V.G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation // *Materials Science and Engineering: A*. 2003. V. 345. P. 81–89. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00358-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00358-1).

9. Newcomb S.B., Stobbs W.M. A transmission electron microscopy study of the white-etching layer on a railhead // *Materials Science and Engineering*. 1984. V. 66. P. 195–204.

10. Ishida M. Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies // *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2013. V. 13. P. 67–74. <https://doi.org/10.56748/ejse.131621>.

11. Steenbergen M., Dollevoet R. On the mechanism of squat formation on train rails: Part I. Origination // *International Journal of Fatigue*. 2013. V. 47. P. 361–372. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.04.023>.

12. Carroll R.J., Beynon J.H. Rolling contact fatigue of white layer. Crock morphology // *Wear*. 2007. V. 262. P. 1253–1266. doi : 10.1016/j.wear.2007.01.003.

13. Градиенты структуры, фазового состава и дислокационной субструктуры рельсов при сверхдлительной эксплуатации / Р.В. Кузнецов [и др.] // *Известия Алтайского государственного университета*. 2022. № 1. С. 44–50. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2022\)1-06](https://doi.org/10.14258/izvasu(2022)1-06).

14. Формирование тонкой структуры перлитной стали при сверхдлительной пластической деформации / К.В. Григорович [и др.] // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. 2022. Т. 503. С. 8–12. DOI : 10.31857/S2686740022020079.

15. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016.

16. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 2014.

17. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016.

18. Конева Н.А., Козлов Э.В. Дислокационная структура и физические механизмы упрочнения металлических материалов // *Перспективные материалы. Структура и методы исследования* :

учеб. пособие / Под ред. Д.Л. Меерсона. Тула : ТГУ. М. : МИСиС. 2006. С. 267–320.

19. Физика и механика волочения и объемной штамповки / В.Е. Громов [и др.]. М., Недра, 1997.

20. Tsellermaer V.Y. Substructural and phase transformations during intense plastic deformation of metals // *Steel in Translation*. 1999. V. 29. № 12. P. 75–81.

21. Эволюция тонкой структуры и свойств металла рельсов при длительной эксплуатации / В.Е. Панин [и др.] // *Физическая мезомеханика*. 2020. Т. 23. № 5. С. 85–94. DOI : 10.24411/1683-805X-2020-15007.

22. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе // *УФН*. 2012. Т. 182. № 12. С. 1351–1357. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201212i.1351>.

23. Роль кривизны решетки в деградации структуры поверхностного слоя металла рельсов при длительной эксплуатации / В.Е. Панин [и др.] // *Доклады РАН. Физика, технические науки*. 2020. Т. 494. С. 68–71. DOI : 10.31857/S2686740020050144.

24. Рыбин В.В. *Большие пластические деформации и разрушение металлов*. М. : Металлургия, 1986.

Информация об авторах

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института Сильноточной электроники СО РАН.

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

М. А. Порфирьев – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

Р. Е. Крюков – доктор технических наук, доцент кафедры металлургии черных металлов Сибирского государственного индустриального университета.

В. В. Шляров – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля.

REFERENCES

1. Yuriev, A.A., Ivanov, Yu.F., Gromov, V.E., Rubannikova, Yu.A., Starostenkov, M.D. & Tabakov, P.Y. (2021). Structure and properties of lengthy rails after extreme long-term operation. Millersville, PA, USA: Materials Research Forum LLC.

2. Ivanisenko, Yu., MacLaren, I., Sauvage, X., Valiev, R.Z. & Fecht, H.-J. (2006). Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe-C composite. *Acta Materialia*, (54), 1659-1669. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.11.034>.

3. Lojkowski, W., Millman, Y., Chugunova, S.I., Goncharova, I.V., Djahanbakhsh, M., Bürkle, G. & Fecht, H.-J. (2003). The mechanical properties of the nanocrystalline layer on the surface of railway tracks.

- Materials Science and Engineering: A.* (303-1-2), 209-215. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01948-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01948-1).
4. Lojowski, W., Djahanbakhsh, M., Bürkle, G., Gierlotka, S., Zielinski, W. & Fecht, H.-J. (2001). Nanostructure formation on the surface of railway tracks. *Materials Science and Engineering: A.* (303), 197-208.
5. Ivanisenko, Yu. & Fecht, H.J. (2008). Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels: effect of high strain rate deformation. *Steel Tech.* (3-1), 19-23.
6. Takahashi, J., Kawakami, K. & Ueda, M. (2010). Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a railtrack surface. *Acta Materialia.* (58), 3602-3612. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.030>.
7. Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Kuznetsov, R.V., Glezer, A.M., Shlyarova, Yu.A. & Peregudov, O.A. (2022). Deformation transformation of structure and phase composition of rail surface during ultra-long operation. *Deformation and destruction of materials.* (1), 35-39. (In Russ.). DOI : 10.31044/1814-4632-2022-1-35-39
8. Gavriluyuk, V.G. (2003). Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation. *Materials Science and Engineering: A.* (345), 81-89. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00358-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00358-1).
9. Newcomb, S.B. & Stobbs, W.M. (1984). A transmission electron microscopy study of the white-etching layer on a railhead. *Materials Science and Engineering.* (66), 195-204.
10. Ishida, M. (2013). Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies. *Electronic Journal of Structural Engineering.* (13), 67-74. <https://doi.org/10.56748/ejse.131621>.
11. Steenbergen, M. & Dollevoet, R. (2013). On the mechanism of squat formation on train rails: Part I. Origination. *International Journal of Fatigue.* (47), 361-372. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.04.023>.
12. Carroll, R.J. & Beynon, J.H. (2007). Rolling contact fatigue of white layer. *Crock morphologie. Wear.* (262), 1253-1266. doi : 10.1016/j.wear.2007.01.003.
13. Kuznetsov, R.V., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Kormyshev, V.E., Shlyarova, Yu.A. & Yuriev, A.A. (2022). Gradients of Structure, Phase Composition, and Dislocation Substructure of Rails under the Ultra Long-Term Operation. *Izvestiya of Altai State University.* (1), 44-50. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2022\)1-06](https://doi.org/10.14258/izvasu(2022)1-06).
14. Grigorovich, K.V., Gromov, V.E., Kuznetsov, R.V., Ivanov, Yu.F. & Shlyarova, Yu.A. (2022). Formation of fine structure of pearlite steel under ultra-long plastic deformation. *Doklady Physics.* (503), 8-12. DOI : 10.31857/S2686740022020079.
15. Egerton, F.R. (2016). *Physical Principles of Electron Microscopy.* Basel: Springer International Publishing.
16. Kumar, C.S.S.R. (2014). *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials.* New York: Springer.
17. Carter, C.B. & Williams, D.B. (2016). *Transmission Electron Microscopy.* Berlin: Springer International Publishing.
18. Koneva, N.A. & Kozlov, E.V. (2006). *Dislocation structure and physical mechanisms of hardening of metallic materials / Perspektivnye materialy. Structure and methods of research (textbook) / Ed. D.L. Meyerson.* Tula: TSU, M. : MISiS.
19. Gromov, V.E., Kozlov, E.V., Bazaikin, V.I. & Ivanov, Yu.F. (1997). *Physics and mechanics of drawing and forging.* M., Nedra.
20. Tsellermaer, V.Y. (1999). Substructural and phase transformations during intense plastic deformation of metals. *Steel in Translation.* (29-12), 75-81.
21. Панин, В.Е., Иванов, Ю.Ф., Юрьев, А.А. Эволюция тонкой структуры и свойств металла рельсов при длительной эксплуатации. *Физическая мезомеханика* 23, 5 (2020). С. 85-94.
22. Панин, В.Е., Егорушкин, В.Е., Панин, А.В. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе // УФН. 2012. Т. 182, № 12. С. 1351-1357.
23. Панин, В.Е., Громов, В.Е., Иванов, Ю.Ф., Юрьев, А.А., Кормышев, В.Е. Роль кривизны решетки в деградации структуры поверхностного слоя металла рельсов при длительной эксплуатации // Докл. РАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 494. С. 68-71.
24. Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М. : Металлургия, 1986.

Information about the authors

Yu. F. Ivanov - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of High Current Electronics SB RAS.

V. E. Gromov - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

M. A. Porfiriev - Researcher, Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University.

R. E. Kryukov - Doctor of Technical Sciences, associate Professor, Department of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University.

V. V. Shlyarov - Post-graduate student of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing (EM&OP), Siberian State Industrial University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 16 марта 2023; одобрена после рецензирования 18 сентября 2023; принята к публикации 20 ноября 2023.

The article was received by the editorial board on 16 Mar 2023; approved after editing on 18 Sep 2023; accepted for publication on 20 Nov 2023.