

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 669.539.392:669.17:548.571:548.4

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.003

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ РЕЛЬСОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**Михаил Анатольевич Порфирьев^{1†}, Юрий Федорович Иванов², Виктор Евгеньевич Громов³, Юлия Андреевна Шлярова⁴, Роман Евгеньевич Крюков⁵**^{1, 3, 4, 5} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия² Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия¹ mporf372@gmail.com[†], <https://orcid.org/0000-0003-3602-5739>² yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>³ gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>⁴ rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>⁵ rek_nzrmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3394-7941>

Аннотация. Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выполнен анализ структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры в головке длинномерных дифференцированно закаленных рельсов специального назначения из стали Э90ХАФ после пропущенного тоннажа 187 млн. тонн брутто. Исследования проведены вдоль центральной оси и радиуса скругления выкружки на поверхности и на расстоянии 10 мм от нее. Установлено, что структура стали представлена зернами пластического перлита и феррито-карбидной смеси с частицами карбида пластической и глобулярной морфологии. Выявлена фрагментация пластин цементита (размеры фрагментов 10-12 нм) и феррита (размеры фрагментов 250-500 нм). Отмечено формирование изгибных контуров экстинкции, свидетельствующих об упруго-напряженном состоянии головки рельсов в результате длительной эксплуатации. Выявлены источники кризисно-кручения кристаллической решетки- внутрифазные (границы раздела зерен перлита) и межфазные (границы раздела пластин феррита и цементита перлитных колоний) границы. Формирующаяся структура на поверхности катания отличается от структуры поверхности выкружки. В последней не выявляется субзеренной структуры. Проведено сравнение деформационного преобразования поверхностных слоев с ранее опубликованными результатами для рельсов общего назначения из доэвтектоидной стали. Рассмотрены механизмы разрушения пластин цементита и повторного выделения частиц наноразмерной карбидной фазы округлой формы (третичный цементит). Проведено сравнение скалярной плотности дислокационной субструктуры поверхности катания по центральной оси и радиусу скругления выкружки.

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

Благодарности: Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение» ФГБОУ ВО «СибГИУ».

Для цитирования: Порфирьев М.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Крюков Р.Е. Анализ структуры поверхностного слоя рельсов специального назначения, формирующейся в процессе эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 1. С. 28–35. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.003.

Original article

ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF THE SURFACE LAYER OF SPECIAL PURPOSE RAILS FORMED DURING OPERATION

Mikhail A. Porfiriev^{1†}, Yurii F. Ivanov², Victor E. Gromov³, Yulia A. Shliarova⁴,
Roman E. Kryukov⁵

^{1,3,4,5} Siberian State Industrial University, Kirov Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia

² Institute of High Current Electronics SB RAS, Academicheskii Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia

¹ mporf372@gmail.com[†], <https://orcid.org/0000-0003-3602-5739>

² yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

³ gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

⁴ rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

⁵ rek_nzrmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3394-7941>

Abstract. Transmission electron diffraction microscopy was used to analyze the structure, phase composition, and dislocation substructure in the head of long-length differentially hardened special-purpose rails made of E90KhAF steel after a tonnage of 187 million gross tons was passed. The studies were carried out along the central axis and rounding radius of the fillet on the surface and at a distance of 10 mm from it. It has been established that the steel structure is represented by grains of plastic pearlite and a ferrite-carbide mixture with carbide particles of plastic and globular morphology. Fragmentation of cementite plates (fragment sizes 10-12 nm) and ferrite (fragment sizes 250-500 nm) was revealed. The formation of bending extinction contours is noted, indicating the elastically stressed state of the rail head as a result of long-term operation. The sources of curvature-torsion of the crystal lattice are revealed - intra-phase (interfaces of pearlite grains) and interfacial (interfaces of ferrite plates and cementites of pearlite colonies) boundaries. The emerging structure on the tread surface differs from the structure of the fillet surface. The latter does not reveal a subgrain structure. The deformation transformation of surface layers is compared with previously published results for general purpose rails made of hypoeutectoid steel. The mechanisms of destruction of cementite plates and the re-isolation of particles of a nanosized rounded carbide phase (tertiary cementite) are considered. A comparison is made of the scalar density of the dislocation substructure of the tread surface along the central axis and the rounding radius of the fillet.

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

Acknowledgements: The study was carried out using the equipment of the Center for Collective Use «Materials Science» of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «SibSIU».

For citation: Porfiriev, M. A., Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Shliarova, Yu. A. & Kryukov, R. E. (2024). Analysis of the structure of the surface layer of special purpose rails formed during operation. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(1), 28–35. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.003.

Введение

В связи с устоявшейся в последние годы тенденцией возрастания скоростей и интенсивности движения на железнодорожном транспорте в разряд актуальных научно и практически значимых задач выходит создание рельсов с высокими эксплуатационными характеристиками. Решение этой проблемы в России осуществляется с 2013 года путем производства длинномерных 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов, а с 2018 года – путем производства рельсов специального назначения. Совершенствование технологии их производства возможно лишь при глубоком анализе механизмов формирования структуры, фазового состава и свойств и их эволюции при длительной эксплуатации [1, 2].

В последние годы на страницах зарубежных [3-9] и отечественных изданий [10-13] активно обсуждаются вопросы, связанные с анализом структурно-фазовых состояний при эксплуатации. Длительные деформационные воздействия инициируют сложные процессы, протекающие в рельсах и способствующие ухудшению механических свойств. Получение информации в этой области определяется как фундаментальностью проблем физического материаловедения, так и практической их значимостью. Установление закономерностей эволюции параметров структурно-фазового состояния и дислокационной субструктуры при длительной эксплуатации рельсов возможно лишь при применении высокоинформативных методов современного физического материаловедения, и в первую очередь, просвечивающей

электронной микроскопии (ПЭМ). Полученный с помощью методов ПЭМ банк данных позволяет количественно оценить вклады структурных составляющих и дефектной субструктуры в упрочнение рельсов при эксплуатации [14-18].

Ранее в наших исследованиях был проведен электронно-микроскопический анализ структурно-фазовых состояний и свойств объемно и дифференцированно закаленных рельсов по центральной оси и радиусу скругления выкружки на разном расстоянии 0, 2, 10 мм от поверхности после пропущенного тоннажа 500-1770 млн. тонн брутто [1, 10-13]. Четыре года назад в России начато производство рельсов категории ДТ400ИК повышенной износостойкости и контактной усталости для эксплуатации в прямых участках пути со скоростями до 200 км/час и кривых участках без ограничения по грузонапряженности. В этой связи анализ структурно-фазовых состояний, дислокационной субструктуры в сечении головки рельсов после длительной эксплуатации представляется актуальным.

Анализ причин износа и деградации свойств рельсов при эксплуатации является традиционным направлением в физике сталей. Анализ работ отечественных [1, 10-13] и зарубежных исследователей [14-18] последних двух десятилетий показывает, что как в объемно-закаленных (пропущенный тоннаж до 1000 млн. тонн) так и в дифференцированно закаленных (пропущенный тоннаж до 1770 млн. тонн) изменение в поверхностных слоях головки рельсов структуры, накопление плотности дислокаций, аномально высокая микротвердость, наличие белого слоя способны привести к выходу рельсов из строя. Выявлен многофакторный характер природы упрочнения поверхности катания рельсов и оценены основные механизмы.

Целью настоящей работы является анализ формирования структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры в поверхностных слоях рельсов из заэвтектидной стали после длительной эксплуатации.

Материал и методики 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. Щербинка).

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) [19-21]. Были выполнены исследования в головке рельсов вдоль центральной оси и радиуса скругления выкружки на расстояниях 0 и 10 мм от поверхности.

Результаты исследования и их обсуждение

Ранее мы отмечали, что структура стали в состоянии после эксплуатации представлена зернами перлита пластинчатой морфологии с размерами, изменяющимися в пределах (1,5-25) мкм [13]. В отдельных случаях в структуре стали наблюдаются зерна глобулярного перлита, т.е. зерна, в которых частицы цемента округлой формы расположены хаотически, и зерна перлита нерегулярного, в котором присутствуют частицы пластинчатой и глобулярной форм.

Пластины цемента в большинстве случаев фрагментированы, т.е. разделены на отдельные области, размеры которых изменяются в пределах (10-12) нм. Подобная фрагментированная структура характерна и для пластин феррита. Продольные размеры фрагментов изменяются в пределах от 250 нм до 500 нм.

Ферритные пластины перлитных колоний содержит дислокационную субструктуру. Наблюдаются преимущественно зерна перлита с хаотически распределенными дислокациями (рис.1). Скалярная плотность дислокаций $\langle \rho \rangle = 3,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

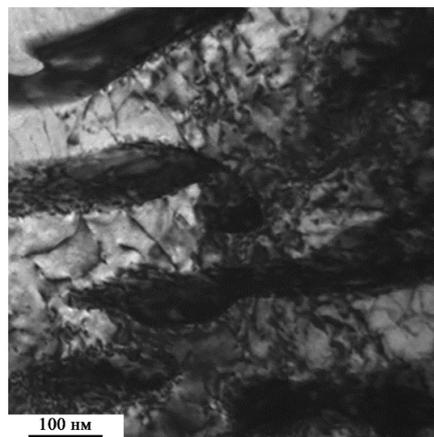


Рис.1. Дислокационная субструктура слоя стали, расположенного на расстоянии 10 мм от поверхности

Fig.1. Dislocation substructure of a steel layer located at a distance of 10 mm from the surface

После длительной эксплуатации исследуемая сталь находится в упруго-напряженном состоянии. Об этом свидетельствуют изгибные экстинкционные контуры, присутствующие на электронно-микроскопических изображениях структуры тонких фольг. Контуры экстинкции выявляются как в ферритной составляющей колоний перлита (рис.2а), так и в частицах цементита (рис.2б). Источниками кривизны-кручения кристаллической решетки являются внутрифазные (границы раздела зерен перлита) и межфазные (границы раздела пластин феррита и цементита перлитных колоний) границы.

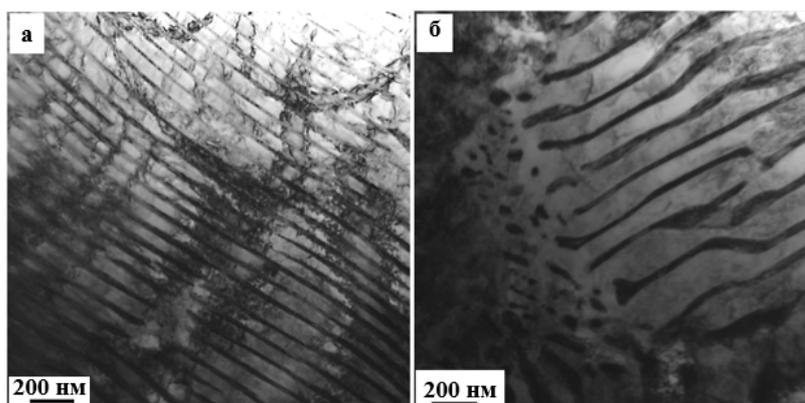


Рис.2. Изгибные экстинкционные контуры в феррите (а) и цементите (б); а, б – светлые поля

Fig.2. Bending extinction contours in ferrite (a) and cementite (b); a, b – light fields

Формирование фрагментированной субструктуры сопровождается множественным изгибом-кручением металла поверхности катания рельсов. Характерное электронно-микроскопическое изображение формирующейся структуры приведено на рис.3.

В отличие от поверхности катания на центральной оси в поверхностном слое выкружки субзернистая структура не выявляется. В результате деформационного воздействия в поверхностном слое формируются области, характеризующиеся наличием большого количества изгибных экстинкционных контуров разнообразной формы. Микроэлектрограмма, поученная с таких областей металла выкружки, характерна для крупнозернистого материала.

Как и для дифференцированно закаленных рельсов общего назначения категории ДТ350 [1, 10-12], деформационное преобразование структуры поверхностного слоя сопровождается разрушением пластин цементита и повторным выделением частиц карбидной фазы, независимо от места исследования рельсов (поверхность катания (рис.4а,б) или поверхность выкружки (рис.4в-д)), это так называемый третичный цементит. Частицы имеют округлую

Эксплуатация рельсов на экспериментальном кольце привела к преобразованиям структурно-фазовых состояний преимущественно поверхностного слоя, связанным с разрушением колоний перлита. При этом формирующаяся структура на поверхности катания отличается от структуры металла рельсов поверхности выкружки. Характерной особенностью структуры металла поверхности катания является разбие-ние пластин феррита перлитных колоний на субзерна, размеры которых изменяются в пределах (100-150) нм.

форму, расположены в объеме пластин феррита преимущественно вдоль межфазных границ раздела пластин феррита и цементита. Размеры вновь образовавшихся частиц изменяются в пределах (5-7) нм.

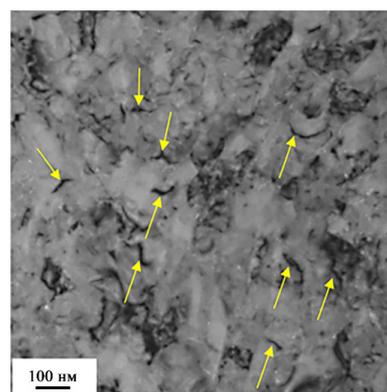


Рис.3. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя поверхности катания рельсов; стрелками указаны контуры экстинкции, формирующиеся от внутрифазных и межфазных границ раздела

Fig.3. Electron microscopic image of the structure of the surface layer of the rail tread surface; the arrows indicate the extinction contours formed from the intraphase and interphase interfaces

Эксплуатация рельсов приводит к изменению дислокационной субструктуры ферритной составляющей стали. Выполненные исследования показывают, что основным типом дислокационной субструктуры поверхностного слоя металла поверхности катания рельсов является

сетчатая (рис.5). Скалярная плотность дислокаций формирующейся дислокационной субструктуры металла поверхности катания $\langle \rho \rangle = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$; для поверхности выкружки $\langle \rho \rangle = 4,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

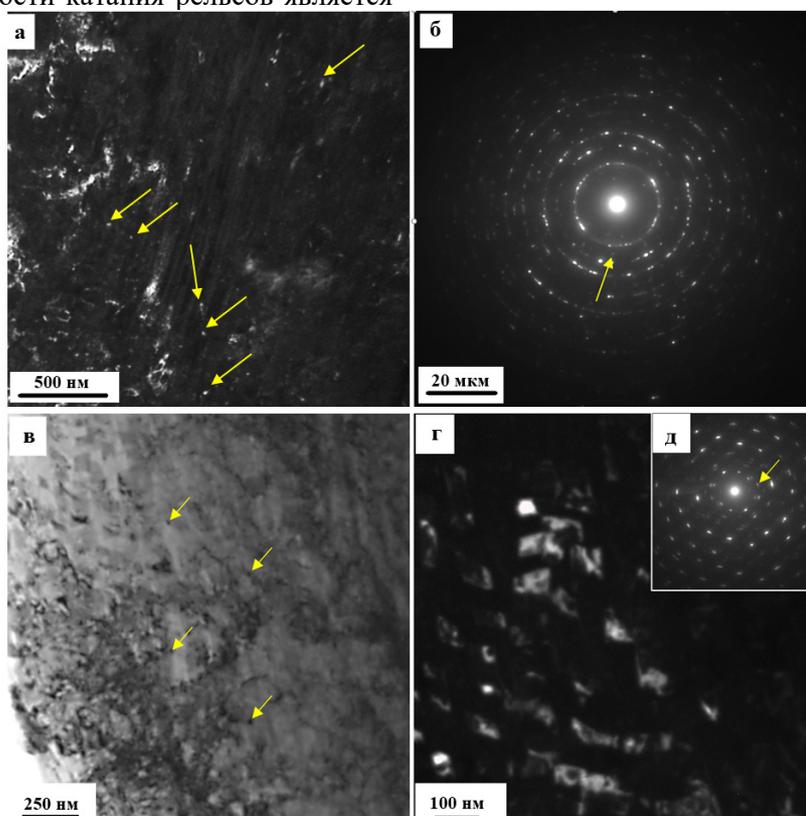


Рис.4. Электронно-микроскопические изображения структуры поверхности катания (а, б) и выкружки (в-д); а – темное поле, полученное в $[122]\text{Fe}_3\text{C}$, б – микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле, в – светлое поле, г – темное поле, полученное в $[131]\text{Fe}_3\text{C}$, д – микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле. На (а, в) стрелками указаны частицы карбидной фазы)

Fig.4. Electron microscopic images of the structure of the tread surface (a, b) and fillets (c-e); a – dark field obtained in $[122]\text{Fe}_3\text{C}$, b – microelectron diffraction pattern, the arrow indicates the reflex in which the dark field was obtained, c – bright field, d – dark field obtained in $[131]\text{Fe}_3\text{C}$, e – microelectron diffraction pattern, arrow the reflection in which the dark field was obtained is indicated.

Arrows in (a, c) indicate particles of the carbide phase)

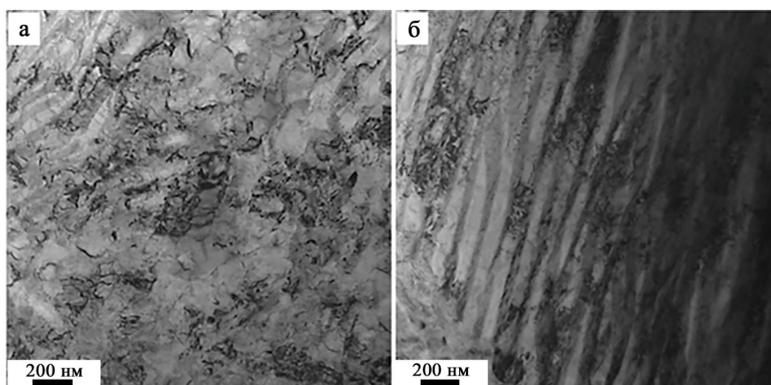


Рис.5. Дислокационная субструктура поверхностного слоя металла поверхности катания рельс (а) и поверхности выкружки (б)

Fig.5. Dislocation substructure of the surface metal layer of the rail tread surface (a) and fillet surface (b)

Заключение

Методами ПЭМ установлено, что структура металла рельсов категории 400ИК после пропущенного тоннажа 187 млн. тонн представлена зернами перлита пластинчатой морфологии с размерами, изменяющимися в пределах (1,5-25) мкм. Показано, что пластины цементита и феррита перлитных колоний фрагментированы, размеры фрагментов пластин цементита изменяются в пределах (10-12) нм, пластин феррита – в пределах (250-500) нм. Показано, что в пластинах феррита перлитных колоний присутствует хаотически распределенная дислокационная субструктура со скалярной плотностью дислокаций $\langle \rho \rangle = 3,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Установлено, что рельсы находятся в упруго-напряженном состоянии, о чем свидетельствуют изгибные экстинкционные контуры, присутствующие на электронно-микроскопических изображениях структуры тонких фольг. Источниками кривизны-кручения кристаллической решетки являются внутрифазные (границы раздела зерен перлита) и межфазные (границы раздела пластин феррита и цементита перлитных колоний) границы. Показано, что длительная эксплуатация на железной дороге привела к множественным преобразованиям структуры поверхностного слоя стали, связанным с разрушением колоний перлита. Характерной особенностью структуры металла поверхности катания является разбиение пластин феррита перлитных колоний на субзерна с размерами субзерен (100-150) нм. В поверхностном слое выкружки субзеренная структура не формируется. Наблюдаются области, характеризующиеся наличием большого количества изгибных экстинкционных контуров разнообразной формы, указывающие на высокий уровень кривизны-кручения материала. Обнаружено, что разрушение пластин карбидной фазы сопровождается образованием наноразмерных (5-7 нм) частиц третичного цементита округлой формы, расположенных в объеме пластин феррита преимущественно вдоль межфазных границ раздела пластин феррита и цементита. Показано, что эксплуатация рельс приводит к повсеместному формированию в стали сетчатой дислокационной субструктуры. Скалярная плотность дислокаций формирующейся дислокационной субструктуры поверхности катания $\langle \rho \rangle = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$; для поверхности выкружки $\langle \rho \rangle = 4,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Список литературы

1. Yuriev A.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. Structure and properties of lengthy rails after extreme long-term operation. Millersville, PA, USA: Materials Research Forum LLC, 2021. 190 p.
2. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yuriev A.B., Morozov K.V. Microstructure of quenched rails. Cambridge. CISP Ltd, 2016. 153 p.
3. 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. V. 54. P. 1659–1669.
4. Ning Jiang-li, Courtois-Manara E., Kurmanaeva L., Ganeev A.V., Valiev R.Z., Kübel C., Ivanisenko Yu. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. V. 581. P. 8–15.
5. Ivanisenko Yu., Wunderlich R.K., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Annealing behavior of nanostructured carbon steel produced by severe plastic deformation // *Scripta Materialia*. 2003. V. 49(10). P. 947–952.
6. MacLaren I., Ivanisenko Yu., Fecht H.-J., Sauvage X., Valiev R.Z. Early stages of nanostructuring of a pearlitic steel by high pressure torsion deformation. *Ultrafine Grained Materials IV*. Edited by Zhu E.T., et al. The Minerals, Metals & Materials Society, 2006. P. 1–6.
7. Lojkowski W., Millman Y., Chugunova S.I., Goncharova I.V., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Fecht H.-J. The mechanical properties of the nanocrystalline layer on the surface of railway tracks // *Materials Science and Engineering: A*. 2003. V. 303(1-2). P. 209–215.
8. Lojkowski W., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Gierlotka S., Zielinski W., Fecht H.-J. Nanostructure formation on the surface of railway tracks // *Materials Science and Engineering: A*. 2001. V. 303. P. 197–208.
9. 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.
10. Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Панин С.В., Кормышев В.Е., Рубанникова Ю.А. Влияние длительной эксплуатации на перераспределение атомов углерода в рельсах // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2020. Т. 17, № 4. С. 449–455.

11. Иванов Ю.Ф., Кормышев В.Е., Громов В.Е., Юрьев А.А., Рубанникова Ю.А. Эволюция структуры и механизмы упрочнения металла рельсов при длительной эксплуатации // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2020. Т. 17, № 4. С. 478–482.

12. Попова Н.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А., Панченко И.А., Кормышев В.Е., Кузнецов Р.В., Шлярова Ю.А. Оценка механизмов упрочнения рельсовой стали при сжатии // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2022. Т. 19, № 4. С. 470–480.

13. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Порфирьев М.А., Крюков Р.Е., Шляров В.В., Полевой Е.В. Эволюция тонкой структуры рельсов из заэвтектоидной стали при эксплуатации // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2023. № 2. С. 63–68.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Pal S., Valente C., Daniel W., Farjoo M. Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation // *Wear*. 2012. V. 284. P. 30–42.

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.

Информация об авторах

М. А. Порфирьев – научный сотрудник управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

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.

Ю. А. Шлярова – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений (ЭМиОИ) Сибирского государственного индустриального университета.

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

References

1. Yuriev, A. A., Ivanov, Yu. F., Gromov, V.E., Rubannikova, Yu. A., Starostenkov, M. D. & Tabakov, P. Ya. (2021). Structure and properties of lengthy rails after extreme long-term operation. Millersville, PA, USA: Materials Research Forum LLC. P. 190.

2. Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Yuriev, A. B. & Morozov, K. V. (2016). Microstructure of quenched rails. Cambridge. CISP Ltd. P. 153.

3. 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.

4. Ning, Jiang-li, Courtois-Manara, E., Kurmanaeva, L., Ganeev, A. V., Valiev, R. Z., Kübel, C. & Ivanisenko, Yu. (2013). Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion. *Materials Science and Engineering: A*, 581, 8–15.

5. Ivanisenko, Yu., Wunderlich, R. K., Valiev, R. Z. & Fecht, H.-J. (2003). Annealing behavior of nanostructured carbon steel produced by severe plastic deformation. *Scripta Materialia*, 49(10), 947–952.

6. MacLaren, I., Ivanisenko, Yu., Fecht, H.-J., Sauvage, X. & Valiev, R. Z. (2006). Early stages of nanostructuring of a pearlitic steel by high pressure torsion deformation. Ultrafine Grained Materials IV. Edited by Zhu E.T., et al. The Minerals, Metals & Materials Society. P. 1–6.

7. 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.
8. Lojkowski, 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.
9. 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.
10. Yuriev, A. A., Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Panin, S. V., Kormyshev, V. E. & Rubannikova, Yu. A. (2020). Effect of long-term operation on redistribution of carbon atoms in rails. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 17(4), 449–455. (In Russ.).
11. Ivanov, Yu. F., Kormyshev, V. E., Gromov, V. E., Yuriev, A. A. & Rubannikova, Yu. A. (2020). Structure evolution and rail metal strengthening mechanisms at long-term operation. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 17(4), 478–482. (In Russ.).
12. Popova, N. A., Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Yuriev, A. A., Panchenko, I.A., Kormyshev, V. E., Kuznetsov, R. V. & Shliarova, Yu. A. (2022). Evaluation of the mechanisms of compression hardening of rail steel. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4(19), 470–480. (In Russ.).
13. Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Porfiriev, M. A., Kryukov, R. E., Shlyarov, V. V. & Polevoy, E. V. (2023). Evolution of the fine structure of rails made of hypereutectoid steel during operation. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*, 2, 63–68. (In Russ.).
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Steenbergen, M. & Dollevoet, R. (2013). On the mechanism of squat formation on train rails: Part I. Origination. *International Journal of Fatigue*, 47, 361–372.
18. Pal, S., Valente, C., Daniel, W. & Farjoo, M. (2012). Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation. *Wear*, 284, 30–42.
19. Egerton, F. R. (2016). *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing. P. 196.
20. Kumar, C. S. S. R. (2014). *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer. P. 717.
21. Carter, C. B. & Williams, D. B. (2016). *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing. P. 518.

Information about the authors

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

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.

Yu. A. Shliarova – 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.

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

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

Статья поступила в редакцию 14.11.2023; одобрена после рецензирования 17.01.2024; принята к публикации 01.02.2024.

The article was received by the editorial board on 14 Nov. 23; approved after reviewing 17 Jan. 24; accepted for publication 01 Feb. 24.