



Оригинальная статья

УДК 669.539.382:669.17:625.1

DOI 10.17073/0368-0797-2022-3-209-215



ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ В ГОЛОВКЕ РЕЛЬСОВ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Р. В. Кузнецов¹, В. Е. Кормышев¹, В. Е. Громов¹,
Ю. Ф. Иванов², Ю. А. Шлярова¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, Академический пр., 2/3)

Аннотация. На макро-, микро- и наномасштабном уровне методами оптической, сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выявлены количественные преобразования структуры на глубине 0, 2, 5, 10 мм по центральной оси и оси симметрии выкружки головки длинномерных дифференцированно закаленных рельсов после экстремально длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 1770 млн т брутто). На макромасштабном уровне на поверхности рабочей выкружки наблюдаются многочисленные неглубокие параллельные трещины контактной усталости, а на поверхности нерабочей выкружки – мелкие выкрашивания. Боковой износ рельса составил 2,5 мм, а вертикальный – 2 мм. Микроструктура металла головки рельса соответствует требованиям стандарта и техническим условиям РЖД. На микромасштабном уровне установлена трансформация пластин цементита путем его разрезания движущимися дислокациями и растворения с уходом углерода на линии дислокаций, мало- и большеугловые границы. Отмечается уменьшение дисперсности микроструктуры по мере удаления от поверхности катания. На наномасштабном уровне формирующаяся в поверхностных слоях субзернистая структура (размер субзерен 110 – 200 нм) содержит наноразмерные частицы цементита (25 – 60 нм), локализованные в стыках и вдоль границ субзерен. Высказано предположение, что данный тип структуры формируется как результат динамической рекристаллизации при мегапластической деформации, реализуемой в процессе экстремально длительной эксплуатации рельсов. Содержание субзернистой структуры в слое выкружки в пять раз превышает содержание в поверхностном слое поверхности катания. Установлено, что в процессе эксплуатации преобразование пластинчатого перлита по центральной оси головки протекает медленнее, чем по оси симметрии выкружки.

Ключевые слова: масштабные уровни, структура, эволюция, рельсы, поверхность катания, выкружка

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

Благодарности: Выражаем благодарность Е.В. Полевому за предоставленные образцы и А.Е. Корочкину за обсуждение результатов работы.

Для цитирования: Кузнецов Р.В., Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. Трансформация структурно-фазовых состояний в головке рельсов при экстремально длительной эксплуатации // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 3. С. 209–215. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-3-209-215>

Original article

TRANSFORMATION OF STRUCTURAL-PHASE STATES IN RAIL HEAD AT EXTREMELY LONG-TERM OPERATION

R. V. Kuznetsov¹, V. E. Kormyshev¹, V. E. Gromov¹,
Yu. F. Ivanov², Yu. A. Shlyarova¹

¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

² Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

Abstract. Quantitative transformations of the structure at a depth of 0, 2, 5, 10 mm along the central and symmetry axis of the fillet of long differentially quenched rails head after extremely long-term operation (passed tonnage of 1770 mln. gross tons) were identified at macro-, micro- and nanoscale levels by methods of optical, scanning and transmission electron diffraction microscopy. At a macroscale level, the numerous shallow parallel cracks of contact fatigue are detected on the surface of working fillet, and on the surface of inoperative fillet there are only small spallings. The lateral wear of the rail was 2.5 mm and the vertical wear was 2 mm. Microstructure of the rail head metal corresponds to the requirements of standards and specifications of the Russian Railways. At microscale level, the transformation of cementite plates was established by cutting it with moving

dislocations and dissolving with the escape of carbon to the dislocation lines, low- and high-angle boundaries. A decrease in microstructure dispersion is noted with a distance from the tread surface. At the nanoscale level, subgrain structure formed in the surface layers (subgrain size 110 – 200 μm) contains nanosized cementite particles (25 – 60 nm) localized at the joints and along the subgrain boundaries. It is supposed that this type of structure is formed as a result of dynamic recrystallization under megaplastic deformation in the process of extremely long-term operation of rails. The content of subgrain structure in the fillet layer is five-fold higher than that in surface layer of the tread surface. It was established that during operation, the transformation of lamellar perlite along the central axis of the head proceeds more slowly than along the symmetry axis of the fillet.

Keywords: scale levels, structure, evolution, rails, tread surface, fillet

Funding: The work was supported by the grant of RFBR (No. 19-32-60001).

Acknowledgements: The authors express their gratitude to E.V. Polevoi for the samples provided, and A.E. Korochkin for discussing the research results.

For citation: Kuznetsov R.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A. Transformation of structural-phase states in rail head at extremely long-term operation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 3, pp. 209–215. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-3-209-215>

ВВЕДЕНИЕ

Срок службы рельсов определяется многими факторами: чистотой металла, структурой, фазовым составом, условиями эксплуатации, технологией термообработки и т.д. В рельсах при современных скоростях движения железнодорожных составов и высоких контактных давлениях уже при сравнительно небольшом пропущенном тоннаже в поверхностных слоях наблюдается сильное изменение структуры, отмечается аномально высокая микротвердость и явление распада цементита. В процессе длительной эксплуатации в рельсах накапливаются многочисленные дефекты, индуцируются сегрегационные, релаксационные, гомогенизационные и рекристаллизационные процессы; фазовые переходы, что может сопровождаться ухудшением физико-механических свойств и являться причинами выхода рельсов из строя [1].

Анализ исследований по проблеме формирования структурно-фазовых состояний в рельсах при длительной эксплуатации позволяет констатировать, что эта проблема является одной из ключевых для физики конденсированного состояния [2].

В работах [1, 2] сформирован банк данных о закономерностях формирования структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры, распределения атомов углерода в головке длинномерных дифференцированно закаленных рельсов по центральной оси и по выкружке после длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 691 и 1411 млн т брутто). К настоящему времени партия рельсов ДТ350, выпущенных в 2013 году на АО «ЕВРАЗ ЗСМК», достигла беспрецедентной в российской практике наработки 1770 млн т брутто пропущенного тоннажа на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ».

В зарубежной литературе исследователи ограничиваются изучением структуры и свойств рельсов после незначительного объема пропущенного тоннажа [3, 4], анализируют формирование белого слоя [5 – 8], механизмы формирования наноструктуры в поверхностном слое рельса [9], контактно-усталостной трещины и распределения неровностей поверхности катания [10 – 11].

Целью настоящей работы является исследование на различных масштабных уровнях изменения структуры и фазового состава в головке 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов после экстремальной эксплуатации на железной дороге (пропущенный тоннаж 1770 млн т брутто).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования были использованы пробы, отобранные от рельса типа Р65 категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ, изъятого из пути на Экспериментальном полигоне г. Щербинка. Рельс изъят из пути после пропуска 1770 млн т брутто по дефекту, классифицированному в соответствии с инструкцией [12] по коду 11.2 (трещины и выкрашивания металла на боковой рабочей выкружке или на средней части головки, возникшие изнутри от местных скоплений неметаллических включений, вытянутых вдоль направления прокатки в виде дорожек-строчек или возникшие от наружной поверхности рельса из-за недостаточной контактно-усталостной прочности рельсового металла). Химический состав металла исследуемого рельса, определенный спектральным и химическим методами, а также требования ТУ 0921-276-01124323 – 2012 для стали марки Э76ХФ приведены в таблице.

Макроструктуру металла выявляли методом глубокого травления в 50 %-ном водном растворе соляной кислоты на расстоянии приблизительно 40 мм от зоны выкрашивания. Исследования микроструктуры металла рельсов проводили методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на шлифах, вырезанных вне дефектной зоны в соответствии с требованиями ТУ 0921-276-01124323 – 2012. Дефектную субструктуру металла изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (ПЭМ) [13 – 17]. Как и в работах [1, 2], объекты исследования для просвечивающего электронного микроскопа готовили путем утонения пластинок, вырезанных из объемной заготовки на расстоянии 2 и 10 мм от поверхности рельса (поверхность катания и рабочая

Химический состав металла рельса категории ДТ350

Chemical composition of metal of the rail of DT350 category

Материал	Содержание, % (по массе)											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo	V
Проба	0,73	0,75	0,58	0,012	0,007	0,42	0,07	0,13	0,002	0,003	0,006	0,04
Требования ТУ	0,71 – 0,82	0,75 – 1,25	0,25 – 0,60	не более		0,20 – 0,80	при суммарной доле не более 0,27		не более 0,004	не более 0,010	–	0,03 – 0,15
				0,020	0,020		≤0,20	≤0,20				

выкружка), а также из пластинки, примыкающей к поверхности рельса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Макроструктура металла исследуемой пробы по осевой ликвации, точечной неоднородности, ликвационным полоскам и трещинам изучали на макротемплете. В результате выполненных исследований каких-либо внутренних дефектов, а также нарушений сплошности не выявлено. Боковой износ рельса составил 2,5 мм, вертикальный – 2 мм. На поверхности рабочей выкружки головки выявлены многочисленные параллельные трещины контактной усталости, на поверхности нерабочей выкружки выявлены мелкие выкрашивания, проходящие полосой шириной до 5 мм по тонким извилистым трещинам. По месту многочисленных параллельных поверхностных трещин контактной усталости, а также по месту мелких выкрашиваний на макротемплете с поверхности головки наблюдаются несплошности глубиной приблизительно до 0,5 мм.

Исследования микроструктуры металла рельсов выявили зерна пластинчатого перлита и в небольшом количестве участки феррита; бейнит в микроструктуре

отсутствует (рис. 1). Таким образом, микроструктура основного металла в головке исследуемого рельса соответствует требованиям стандарта.

Анализ микроструктуры металла исследуемого рельса на глубине 2, 5 и 10 мм от поверхности катания по вертикальной оси и вдоль радиуса скругления поверхности выкружки показал, что по мере удаления от поверхности дисперсность микроструктуры уменьшается.

Более детальные исследования микроструктуры металла головки рельса методами сканирующей электронной микроскопии показали, что микроструктура металла сформирована зернами высокодисперсного перлита с незначительными участками структурно-свободного феррита (рис. 2). Основная доля перлита – регулярные колонии с правильным чередованием цементитных и ферритных пластинок. В зоне выкружки и средней части головки рельса в микроструктуре наблюдается значительное количество перлитных колоний с изогнутыми (волнистыми) и разрушившимися пластинами цементита, а также участки вырожденного перлита.

Исследования структуры металла головки методами ПЭМ позволили детализировать структурно-фазовое состояние перлита в исследуемой пробе. Было установлено, что независимо от направления исследования (по

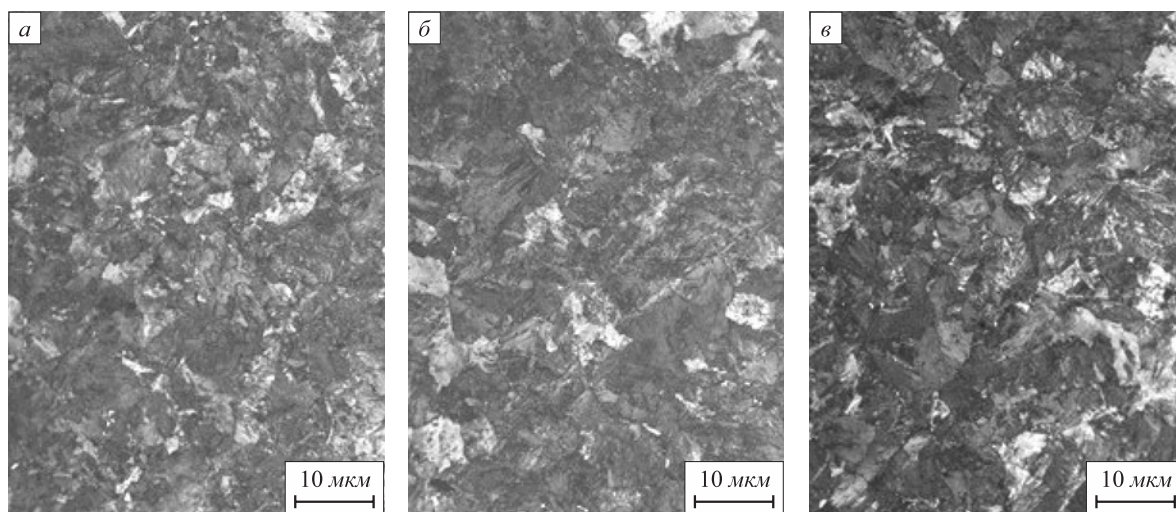


Рис. 1. Микроструктура металла в головке исследуемого рельса на глубине 2 (а), 5 (б) и 10 мм (в) от поверхности катания по вертикальной оси

Fig. 1. Microstructure of metal in the head of investigated rail at a depth of 2 (a), 5 (b) and 10 mm (v) from tread surface along vertical axis

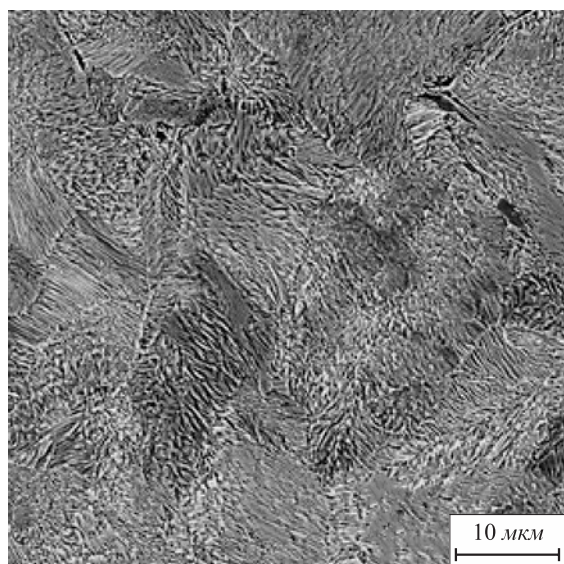


Рис. 2. Микроструктура металла в головке исследуемого рельса на глубине 2 мм. Сканирующая электронная микроскопия травленного шлифа

Fig. 2. Microstructure of metal in the head of investigated rail at a depth of 2 mm. Scanning electron microscopy of etched strip

радиусу скругления выкружки или вдоль центральной оси головки) в стали присутствует несколько структурных состояний перлита, которые по морфологическому признаку классифицированы следующим образом:

- во-первых, это структура перлита пластинчатой морфологии с чередованием параллельно расположенных пластин цементита и феррита (рис. 3, а);
- во-вторых, перлит разрушенный, в котором отсутствуют протяженные пластины цементита. Они раз-

дроблены и сдвинуты относительно исходной осевой линии (рис. 3, б). Такая структура формируется в результате среза и сдвига пластин цементита движущимися дислокациями [18, 19];

– в-третьих, феррито-карбидная смесь (вырожденный перлит), в которой в зернах феррита частицы цементита различной формы и размеров расположены хаотично (рис. 3, в).

– в-четвертых, зерна феррита, в объеме которых наблюдается полосовая субструктура, организованная малоугловыми границами (рис. 3, г). Цементит в таких зернах присутствует в виде частиц округлой формы, расположенных вдоль малоугловых границ.

На поверхностях катания и рабочей выкружки наблюдаются зерна феррита с фрагментированной (субзеренной) структурой (рис. 4). В стыках и вдоль границ субзерен размерами 110 – 200 нм располагаются частицы цементита округлой формы размерами 25 – 60 нм. Можно предположить, что данный тип структуры сформировался в результате динамической рекристаллизации стали при интенсивной пластической деформации и циклическом нагружении металла рельсов в процессе длительной эксплуатации [20].

Относительное содержание выявленных морфологических разновидностей структуры металла с использованием методов стереологии приведено на рис. 5.

Видно, что преобразование структуры перлита пластинчатой морфологии относительно центральной оси в процессе эксплуатации протекает существенно медленнее по сравнению с изменением структуры относительно радиуса скругления рабочей выкружки. Субзеренная структура формируется преимущественно в поверхностном слое рельса. Относительное

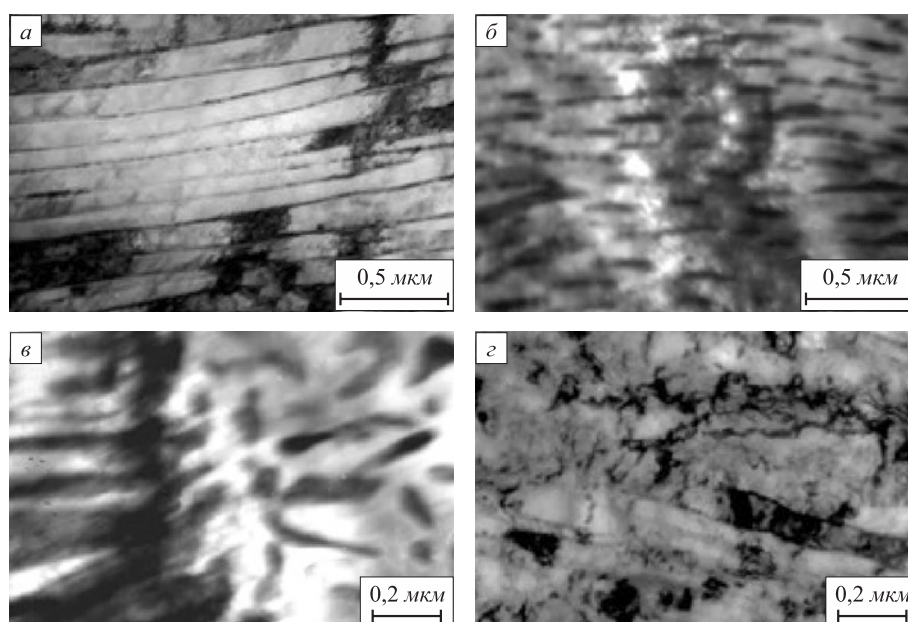


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры металла головки рельса

Fig. 3. Electron microscopic image of metal structure of the rail head

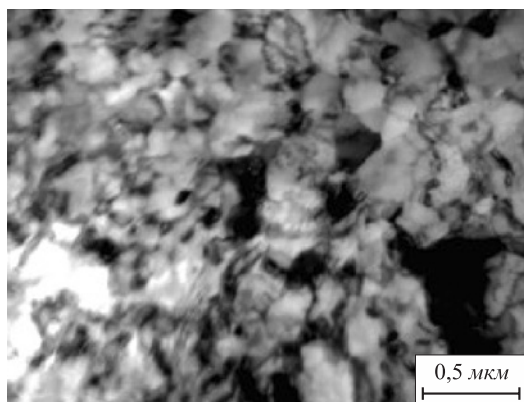


Рис. 4. Фрагментированная (субзеренная) структура, формирующаяся в поверхностном слое металла головки рельса

Fig. 4. Fragmented (subgrain) structure formed in surface layer of the rail head metal

содержание субзеренной структуры в поверхностном слое рабочей выкружки в пять раз выше, чем в поверхностном слое поверхности катания. Вышеизложенное свидетельствует о значительно более высоком уровне преобразования структуры металла вдоль радиуса рабочей выкружки по сравнению с металлом вдоль центральной оси.

Выводы

Методами оптической, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии проведены на различных структурно-масштабных уровнях исследования структуры и фазового состава в головке длиномерных дифференцированно закаленных рельсов после пропущенного тоннажа 1770 млн т. На макроуровне выявлено формирование износа рельса (бокового в слое толщиной 2,5 мм, вертикального – 2 мм). На поверхности рабочей выкружки головки выявлены многочисленные параллельные трещины контактной усталости, на поверхности нерабочей выкружки выявлены мелкие выкрашивания, проходящие полосой шириной до 5 мм по тонким извилистым трещинам. По месту многочисленных параллельных поверхностных трещин контактной усталости, а также по месту мелких выкрашиваний на макротемплете с поверхности головки наблюдаются несплошности глубиной до 0,5 мм.

На микроуровне выявлено существенное преобразование структурно-фазового состояния зерен пластинчатого перлита, сопровождающееся разрушением пластин цементита путем их разрезания движущимися дислокациями и растворения с уходом углерода из решетки цементита на линии дислокаций, малоугловые и большеугловые границы. На наноразмерном уровне выявлено формирование субзеренной структуры, содержащей наноразмерные частицы цементита, расположенные в стыках и вдоль границ субзерен. Размеры субзерен изменяются в пределах от 110 до

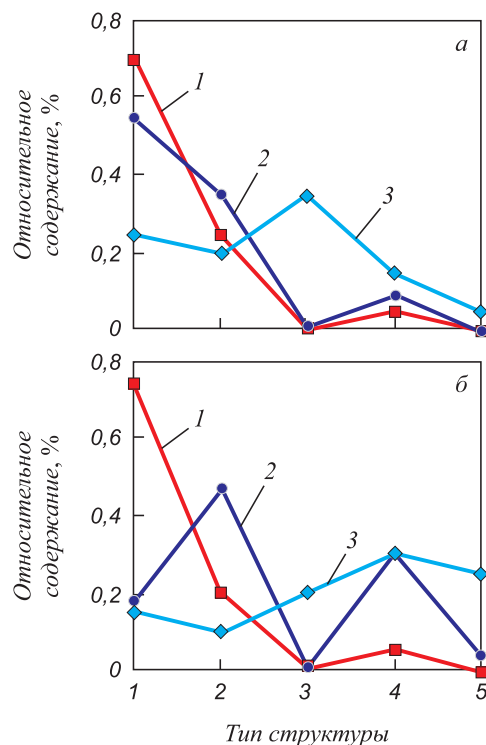


Рис. 5. Относительное содержание различных типов структуры металла головки рельса, выявленных вдоль центральной оси (относительно поверхности катания) (а) и вдоль радиуса скругления рабочей выкружки (б).

Кривые: 1 – относительное содержание типов структуры в слое, расположенном на глубине 10 мм; 2 – в слое, расположенном на глубине 2 мм; 3 – в поверхностном слое.

Типы структуры: 1 – перлит пластинчатой морфологии; 2 – перлит разрушенный; 3 – вырожденный перлит (феррито-карбидная смесь); 4 – зерна феррита, в объеме которых наблюдается полосовая субструктура; 5 – зерна феррита с фрагментированной (субзеренной) структурой

Fig. 5. Relative content of various types of structure of the rail head metal identified along the central axis (relative to the tread surface) (a) and along the radius of rounding of the working fillet (b).

Curve 1 – relative content of structure types in the layer located at a depth of 10 mm; 2 – in the layer located at a depth of 2 mm; 3 – in the surface layer.

Types of structure: 1 – perlite of lamellar morphology; 2 – destroyed perlite; 3 – degenerate perlite (ferrite-carbide mixture); 4 – ferrite grains, in the volume of which a strip sub-structure is observed; 5 – ferrite grains with fragmented (subgrain) structure

200 нм, размеры частиц цементита – от 25 до 60 нм. Высказано предположение, что данный тип структуры формируется в результате динамической рекристаллизации стали при циклическом нагружении в процессе длительной эксплуатации рельсов. Установлено, что преобразование структуры перлита пластинчатой морфологии относительно центральной оси головки протекает медленнее по сравнению с изменением структуры относительно радиуса скругления рабочей выкружки. Относительное содержание субзеренной структуры, формирующейся в поверхностном слое рабочей выкружки, в пять раз выше, чем в поверхностном слое поверхности катания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

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. 193 p.
2. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kormyshev V.E., Yuriev A.A., Semin A.P., Rubannikova Yu.A. Change in structural-phase states and properties of lengthy rails during extremely long-term operation // Progress in Physics of Metals. 2020. Vol. 21. No. 4. P. 527–553. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.04.527>
3. 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. Vol. 3. No. 1. P. 19–23.
4. 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. No. 6. P. 1659–1669. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.11.034>
5. Wu J., Petrov R.H., Kölling S., Koenraad P., Malet L., Godet S., Sietsma J. Micro and nanoscale characterization of complex multilayer-structured white etching layer in rails // Metals. 2018. Vol. 8. No. 10. P. 749–761. <https://doi.org/10.3390/met8100749>
6. Zhang H.W., Ohsaki S., Mitao S., Ohnuma M., Hono K. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail // Material Science and Engineering: A. 2006. Vol. 421. No. 1–2. P. 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.033>
7. Takahashi J., Kawakami K., Ueda M. Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a rail track surface // Acta Materialia. 2010. Vol. 58. No. 10. P. 3602–3612. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.030>
8. Newcomb S.B., Stobbs W.M. A transmission electron microscopy study of the white-etching layer on a rail head // Material Science and Engineering. 1984. Vol. 66. No. 2. P. 195–204. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(84\)90180-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(84)90180-0)
9. Lojkowski W., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Gierlotka S., Zielleski W., Fecht H.-J. Nanostructure formation on the surface of railway tracks // Material Science and Engineering: A. 2001. Vol. 303. No. 1–2. P. 197–208. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01947-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01947-X)
10. Wild E., Wang L., Hasse B., Wroblewski T., Goerigk G., Pyzalla A. Microstructure alterations at the surface of a heavily corrugated rail with strong ripple formation // Wear. 2003. Vol. 254. No. 9. P. 876–883. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00239-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00239-4)
11. Ishida M. Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies // Electronic Journal of Structural Engineering. 2013. Vol. 13. No. 1. P. 67–74.
12. Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов». Москва: Распоряжение ОАО «РЖД» № 2499 от 23.10.2014.
13. Kumar C.S.S.R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. New York: Springer, 2014. 717 p.
14. Carter C.B., Williams D.B. Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing, 2016. 518 p.
15. Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer International Publishing, 2016. 196 p.
16. Томас Г., Гориндж М.Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. Москва: Наука, 1983. 320 с.
17. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон, Д. Пэшли, М. Уэлан. Москва: Мир, 1968. 574 с.
18. Гаврилюк В.Г., Герцрикен Д.С., Полушкин Ю.А., Фальченко В.М. Механизм распада цементита при пластической деформации стали // Физика металлов и металловедение. 1981. Т. 51. № 1. С. 147–152.
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, 193 p.
2. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kormyshev V.E., Yuriev A.A., Semin A.P., Rubannikova Yu.A. Change in structural-phase states and properties of lengthy rails during extremely long-term operation. Progress in Physics of Metals. 2020, vol. 21, no. 4, pp. 527–553. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.04.527>
3. 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, vol. 3, no. 1, pp. 19–23.
4. 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, no. 6, pp. 1659–1669. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.11.034>
5. Wu J., Petrov R.H., Kölling S., Koenraad P., Malet L., Godet S., Sietsma J. Micro and nanoscale characterization of complex multilayer-structured white etching layer in rails. Metals. 2018, vol. 8, no. 10, pp. 749–761. <https://doi.org/10.3390/met8100749>
6. Zhang H.W., Ohsaki S., Mitao S., Ohnuma M., Hono K. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail. Material Science and Engineering: A. 2006, vol. 421, no. 1–2, pp. 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.033>
7. Takahashi J., Kawakami K., Ueda M. Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a rail track surface. Acta Materialia. 2010, vol. 58, no. 10, pp. 3602–3612. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.030>
8. Newcomb S.B., Stobbs W.M. A transmission electron microscopy study of the white-etching layer on a rail head. Material Science and Engineering. 1984, vol. 66, no. 2, pp. 195–204. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(84\)90180-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(84)90180-0)
9. Lojkowski W., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Gierlotka S., Zielleski W., Fecht H.-J. Nanostructure formation on the surface of railway tracks. Material Science and Engineering: A. 2001, vol. 303, no. 1–2, pp. 197–208. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01947-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01947-X)
10. Wild E., Wang L., Hasse B., Wroblewski T., Goerigk G., Pyzalla A. Microstructure alterations at the surface of a heavily corrugated rail with strong ripple formation. Wear. 2003, vol. 254, no. 9, pp. 876–883. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00239-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00239-4)
11. Ishida M. Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies. Electronic Journal of Structural Engineering. 2013, vol. 13, no. 1, pp. 67–74.
12. Rail defects. Classification, catalog and parameters of defective and acute-defective rails. Instruction. Moscow: Order of the Russian Railways no. 2499 of 10.23.2014. (In Russ.).
13. Kumar C.S.S.R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. New York: Springer, 2014, 717 p.
14. Carter C.B., Williams D.B. Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing, 2016, 518 p.
15. Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer International Publishing, 2016, 196 p.
16. Tomas G., Goringe M.J. Transmission Electron Microscopy of Materials. New York-Chichester-Brisbane-Toronto, John Wiley Sons, 1979, 320 p. (Russ. ed.: Tomas G., Goringe M. Prosvechivayushchaya elektronnyaya mikroskopiya materialov. Moscow: Nauka, 1983, 320 p.).
17. Hirsch P.B., Howie A., Nicholson R., Pashley D.W., Whelan M.J. The Electron Microscopy of Thin Crystals. Butterworths, 1965, 549 p. (Russ. ed.: Hirsh P., Howie R., Nicholson R. Elektronnaya mikroskopiya tonkikh kristallov. Moscow: Mir, 1968, 574 p.). <https://doi.org/10.1107/S0365110X66003256>
18. Gavriluk V.G., Gertsriken D.S., Polushkin Yu.A., Fal'chenko V.M. Mechanism of cementite decomposition during plastic deformation of steel. Physics of Metals and Metallography. 1981, vol. 51, no. 1, pp. 125–129.

19. Гриднев В.Н., Гаврилюк В.Г. Распад цементита при пластической деформации стали // Металлофизика. 1982. Т. 4. № 3. С. 74–87.
20. Глезер А.М. О природе сверхвысокой пластической (мегапластической) деформации // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2007. Т. 71. № 12. С. 1764–1772.
19. Gridnev V.N., Gavriluk V.G. Cementite decomposition in steel under plastic deformation (A review). *Physics of Metals (English Translation of Metallofizika)*. 1982, vol. 4, no. 3, pp. 531–551.
20. Glezer A.M. On the nature of ultrahigh plastic (Megaplastic) strain. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics*. 2007, vol. 71, no. 12, pp. 1722–1730. <http://doi.org/10.3103/S106287380712012X>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Роман Вадимович Кузнецов, соискатель степени к.т.н. кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: mail@kuzmash.com

Василий Евгеньевич Кормышев, к.т.н., старший научный сотрудник Управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-5147-5343
E-mail: 89236230000@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-5147-5343
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники СО РАН
ORCID: 0000-0001-8022-7958
E-mail: yufi55@mail.ru

Юлия Андреевна Шлярова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-5677-1427
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Roman V. Kuznetsov, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Science named after V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: mail@kuzmash.com

Vasilii E. Kormyshev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Department of Scientific Researches, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-5147-5343
E-mail: 89236230000@mail.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-5147-5343
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-8022-7958
E-mail: yufi55@mail.ru

Yuliya A. Shlyarova, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-5677-1427
E-mail: rubannikova96@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Р. В. Кузнецов – проведение оптической микроскопии образцов рельсовой стали.
В. Е. Кормышев – анализ результатов, написание текста рукописи.
В. Е. Громов – концепция работы, анализ ПЭМ изображений, написание текста рукописи.
Ю. Ф. Иванов – проведение электронно-микроскопических исследований, анализ результатов.
Ю. А. Шлярова – обзор литературы по структурно-фазовым состояниям в рельсовой стали, оформление статьи.

R. V. Kuznetsov – optical microscopy of rail steel samples.
V. E. Kormyshev – analysis of the results, writing the article.
V. E. Gromov – concept of work, analysis of TEM images, writing the article.
Yu. F. Ivanov – conducting electron microscopic studies, analysis of the results.
Yu. A. Shlyarova – review of the literature on structural-phase states in rail steel, design of the article.

Поступила в редакцию 12.07.2021
После доработки 30.08.2021
Принята к публикации 27.09.2021

Received 12.07.2021
Revised 30.08.2021
Accepted 27.09.2021