

*Оригинальная статья*

УДК 669.539.382:669.17:625.1

## ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ И АТОМОВ УГЛЕРОДА В ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСАХ ПРИ УЛЬТРАДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ю. Ф. Иванов<sup>1</sup>, В. Е. Громов<sup>2</sup>, А. А. Юрьев<sup>3</sup>, М. О. Ефимов<sup>2</sup>, Р. В. Кузнецов<sup>2</sup>,  
И. А. Панченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический 2/3)

<sup>2</sup>Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

<sup>3</sup>АО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Космическое шоссе, 16)

**Аннотация.** Методами сканирующей, просвечивающей электронной микроскопии выполнены исследования перераспределения карбидной фазы и атомов углерода в сечении головки на расстояниях 0, 2 и 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 т брутто).

**Ключевые слова:** рельсы, карбидная фаза, углерод, перераспределение, эксплуатация

**Для цитирования:** Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., А.А., Юрьев А.А., Ефимов М.О., Кузнецов Р.В., Панченко И.А. Перераспределение карбидной фазы и атомов углерода в дифференцированно закаленных рельсах при ультрадлительной эксплуатации // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 3 (41). С. 4 – 10.

*Original article*

## REDISTRIBUTION OF THE CARBIDE PHASE AND CARBON ATOMS IN DIFFERENTIALLY HARDENED RAILS UNDER ULTRA-LONG OPERATION

Y. F. Ivanov<sup>1</sup>, V. E. Gromov<sup>2</sup>, A. A. Yuriev<sup>3</sup>, M. O. Efimov<sup>2</sup>, R. V. Kuznetsov<sup>2</sup>,  
I. A. Panchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of High-Current Electronics SB RAS (2/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)

<sup>2</sup>Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

<sup>3</sup>JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16 Kosmicheskoy Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654043, Russian Federation)

**Abstract.** The methods of scanning, transmission electron microscopy were used to study the redistribution of carbide phases and carbon atoms in the cross section of the head at distances of 0, 2, 10 mm from the surface along the rounding radius of the fillet and along the central axis of 100-meter differentially hardened rails after extremely long term operation (passed tonnage with 2013 1770 million gross tons).

**Keywords:** rails, carbide phase, carbon, redistribution, exploitation

**For citation:** Ivanov Yu.F., Gromov V.E., A.A., Yuriev A.A., Efimov M.O., Kuznetsov R.V., Panchenko I.A. Redistribution of the carbide phase and carbon atoms in differentially hardened rails under ultra-long operation. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (41), pp. 4 – 10. (In Russ.).

### **Введение**

Анализ причин износа и деградации свойств рельсов при эксплуатации является традиционным направлением в физике сталей. Изучение работ отечественных и зарубежных исследователей за последние два десятилетия показывает, что как в объемно-закаленных, так и в дифференцированно закаленных рельсах изменение структуры в поверхностных слоях головки, накопление плотности дислокаций, аномально высокая микротвердость, наличие белого слоя способны привести к выходу рельсов из строя [1].

Длительные деформационные воздействия на рельсы инициируют в них сложные процессы, которые способствуют ухудшению механических свойств. Получение информации в этой области определяется как фундаментальностью проблем физики конденсированного состояния, 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) [2 – 8]. Полученный с помощью методов ПЭМ банк данных позволяет количественно оценить вклады структурных составляющих и дефектной субструктуры в упрочнение рельсов при эксплуатации. Пластинчатый перлит является основной структурной составляющей рельсов. В процессе длительной эксплуатации его трансформация будет во многом определять эксплуатационные свойства рельсов.

Целью настоящей работы является количественная оценка перераспределения карбидной фазы и атомов углерода в головке рельсов при длительной эксплуатации.

### **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).

Количественный анализ структуры стали осуществляли методами стереологии и количественной электронной микроскопии; фазовый анализ стали проводили путем индирования микроэлек-

тронограмм с применением темнопольной методики. Металлографические исследования выполнялись на оптическом микроскопе Olympus GX51, оснащенном цифровой камерой с программным обеспечением Siam Photolab 700. Макроструктуру металла рельсов выявляли в соответствии с требованиями Российского стандарта 51685 – 2013 на полнопрофильном темплете, вырезанном из рельса в поперечном направлении.

Концентрацию атомов углерода в кристаллической решетке  $\alpha$ -железа определяли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD-6000, Shimadzu). Исследования 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 [1].

### **Результаты и их обсуждение**

Независимо от направления исследования в слое толщиной не менее 2,0 мм преобразование зерен и колоний пластинчатого перлита протекает в несколько этапов. 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 железа 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, наблюдаются области материала с поликристаллической структурой.

Микроэлектроннограмма, полученная с фольги вблизи поверхности катания, имеет кольцевое строение. Последнее указывает на субмикронномасштабный размер кристаллитов. Количественный анализ такой структуры показывает, что размеры кристаллитов изменяются в пределах от 150 до 250 нм. Дифракционные кольца сформированы отдельно расположенными точечными рефлексами. Такое строение колец свидетельствует о большеугловой разориентации кристаллитов, то есть о формировании именно зеренной

**Количественные характеристики структуры рельсов после пропуска 1770 млн т brutto**  
**Table 1. Quantitative characteristics of the structure of rails after passing 1770 million tons gross**

| Параметр (среднее по анализируемому слою) | Расстояние до поверхности катания, мм |      |             | Расстояние до рабочей выкружки |      |             |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|------|-------------|--------------------------------|------|-------------|
|                                           | 10                                    | 2    | поверхность | 10                             | 2    | поверхность |
| Объемная доля $\text{Fe}_3\text{C}$ , %   | 10,40                                 | 8,20 | 4,50        | 9,60                           | 3,60 | 3,10        |
| Доля углерода, %                          | 0,74                                  | 0,59 | 0,32        | 0,69                           | 0,26 | 0,22        |

структуры. На границах зерен феррита располагаются частицы карбидной фазы. Размеры частиц изменяются в пределах от 25 до 75 нм. Можно предположить, что такой тип структуры сформировался в результате динамической рекристаллизации стали, имеющей место при циклическом нагружении металла рельсов в процессе сверхдлительной эксплуатации [9 – 11].

Эксплуатация рельсов сопровождается деформационным преобразованием структуры перлита, проявлениями которого являются 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 (табл. 1).

Выполненные оценки показывают, что концентрация углерода в слое на глубине 2 мм составляет 0,26 % (по массе), а в поверхностном слое выкружки – 0,22 % (по массе). Для центральной оси симметрии эти значения составляют 0,59 и 0,32 % (по массе) соответственно (табл. 1).

Согласно литературным данным [1, 16, 17] оценку количества атомов углерода, формирующих карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ , проводили с использованием выражения  $\Delta C = (\text{Fe}_3\text{C}) = 0,07\Delta V$  (где  $\Delta V$  – объемная доля частиц карбидной фазы).

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), то есть реализацией процесса динамического

старения стали. Взаимодействие дислокаций с атомами внедрения приводит к закреплению дислокаций, препятствующему их дальнейшему движению, что способствует существенному упрочнению материала и приводит, в конечном итоге, к его охрупчиванию. Факт охрупчивания поверхностного слоя металла проявляется в формировании множественных микро- и макротрещин в головке рельсов.

Известно, что углерод в структуре стали может находиться в твердом растворе на основе  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железа (на позиции элементов внедрения), на дислокациях (в виде атмосфер Коттрелла и Максвелла), на межфазных (карбид – матрица) и внутрифазных (границы зерен, пакетов и кристаллы пакетного и пластинчатого мартенсита) границах, в частицах карбидной фазы.

Оценку относительного содержания углерода в кристаллической решетке  $\alpha$ -Fe и частицах карбидных фаз стали осуществляли по выражениям, приведенным в табл. 2 (где  $\Delta V_\alpha$  и  $\Delta V_i$  – объемная доля  $\alpha$ -Fe и карбидных фаз;  $a_\alpha = 0,28782$  нм – текущий параметр решетки  $\alpha$ -фазы;  $a_\alpha^0 = 0,28668$  нм – табличное значение параметра решетки  $\alpha$ -фазы;  $C_0$  – среднее содержание углерода в стали).

Результаты выполненных оценок представлены в табл. 3. Если в исходном состоянии основной фазой, содержащей атомы углерода, являются частицы цементита, то после эксплуатации рельсов местом расположения углерода (наряду с частицами цементита) являются дефекты кристаллической структуры стали (дислокации, границы зерен и субзерен), а в поверхностном слое стали углерод обнаруживается и в кристаллической решетке  $\alpha$ -железа.

Из табл. 3 также следует, что процессы эво-

**Оценочные выражения для анализа распределения углерода в стали**  
**Table 2. Evaluation expressions for the analysis of carbon distribution in steel**

| Место расположения углерода                | Оценочное выражение                                                                   |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Твердый раствор на основе $\alpha$ -железа | $\Delta C_\alpha = \Delta V_\alpha \frac{a_\alpha - a_\alpha^0}{39 \pm 4} \cdot 10^3$ |
| Частицы карбидных фаз                      | $\Delta C(\text{Fe}_3\text{C}) = 0,07 \cdot \Delta V_i$                               |
| Элементы дефектной структуры               | $\Delta C_d = C_0 - \Delta C_\alpha - \Delta C(\text{Fe}_3\text{C})$                  |

**Распределение атомов углерода в структуре рельсов (пропущенный тоннаж 1770 млн т брутто)**  
**Table 3. Distribution of carbon atoms in the structure of rails (missed tonnage 1770 million tons gross)**

| Структурный элемент                                       | Концентрация углерода, % (по массе)   |      |      |                                        |      |      |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------|------|------|----------------------------------------|------|------|
|                                                           | Расстояние до поверхности катания, мм |      |      | Расстояние до поверхности выкружки, мм |      |      |
|                                                           | 0                                     | 2    | 10   | 0                                      | 2    | 10   |
| Частицы цементита                                         | 0,32                                  | 0,59 | 0,74 | 0,22                                   | 0,26 | 0,69 |
| Кристаллическая решетка $\alpha$ -Fe                      | 0                                     | 0    | 0    | 0                                      | 0    | 0    |
| Дефекты структуры стали (дислокации, субграницы, границы) | 0,44                                  | 0,17 | 0,02 | 0,54                                   | 0,50 | 0,07 |

люции/деградации карбидной фазы и перераспределения атомов углерода наиболее интенсивно реализуются в поверхностных слоях до 2 мм. Увеличение пропущенного тоннажа также сопровождается заметным перемещением атомов углерода на дефекты структуры стали в рабочей выкружке по сравнению с поверхностью катания.

Эксплуатация рельсов по определению должна происходить при нагрузках ниже предела текучести стали. Более того, преимущественной схемой нагружения материала на поверхности катания является сжатие, что должно препятствовать возможному зарождению микротрещин. Наконец, воздействие движущегося железнодорожного транспорта имеет циклический характер, поэтому происходящие изменения следует классифицировать как имеющие преимущественно усталостную природу.

Механизм распада цементита заключается в «вытягивании» в процессе пластической деформации дислокациями атомов углерода из решетки карбидной фазы с образованием атмосфер Коттрелла вследствие заметной разницы средней энергии связи атомов углерода с дислокациями (0,6 эВ) и с атомами железа в решетке цементита (0,4 эВ). Согласно классическим представлениям диффузия углерода протекает в поле напряжений, создаваемом дислокационной субструктурой, которая формируется вокруг пластин цементита. При этом степень распада цементита, как правило, определяется величиной плотности дислокаций и типом субструктуры [12–15].

При «вытягивании» атомов углерода из кристаллической решетки наблюдается изменение дефектной субструктуры карбида из-за проникновения дислокаций в решетку цементита. Однако некогерентная межфазная граница  $\alpha$ -Fe – Fe<sub>3</sub>C будет этому препятствовать, оставляя возможным лишь диффузионный массоперенос, который может быть реализован по различным механизмам, обсуждаемым в работах В.Г. Гаврилюка (диффузией по междоузлиям и по деформационным вакансиям).

В работах академика В.Е. Панина показано, что ротационные моды пластической деформации связаны с формированием локальной кривизны решетки; в этой связи можно полагать, что развитие подобного эффекта в металле рельсов делает возможным (облегченным) перемещение атомов углерода. В силу циклического характера приложения нагрузки такой механизм может развиваться обратимо, что позволяет элементам внутренней структуры перестраиваться без образования несплошностей. Следует особо отметить, что данный процесс не носит диффузионного характера, поскольку развивается в условиях невысоких температур, а нагрузка прикладывается нерегулярно, но циклически. При пропущенном тоннаже 1770 млн т в поверхностном слое накапливается критическая плотность дефектов, что сдерживает развитие обратимой упругой деформации и вовлечение (развитие) механизма пластической дисторсии. Формирование подобной «критической» структуры будет завершаться зарождением микротрещин по усталостному механизму и выходом рельсов из строя. По этой причине повышение ресурса работы рельсов может быть достигнуто за счет как можно более длительного сохранения структуры, способной к развитию обратимых деформационных процессов, которые исключают разрушение цементитных пластин в перлитных колониях с последующим перемещением атомов углерода на дефекты (дислокации) и области решетки  $\alpha$ -железа.

### **Выводы**

Сверхдлительная эксплуатация рельсов сопровождается существенным снижением объемной доли карбидной фазы в поверхностном слое головки (от 10,4 % на расстоянии 10 мм по центральной оси до 4,5 % на поверхности катания и от 9,6 до 3,1 % по радиусу скругления выкружки соответственно), что может быть обусловлено как обезуглероживанием поверхностного слоя, так и выходом атомов углерода на дефекты структуры стали. При этом данный процесс в

поверхностном слое выкружки развит в значительно большей степени по сравнению с поверхностью катания.

Проведена оценка перераспределения атомов углерода в структуре рельсов и показано, что если в исходном состоянии основное содержание углерода наблюдается на частицах цемента (0,74 % (по массе)), то после эксплуатации – на дефектах структуры и его концентрация составляет 0,24 и 0,4 % на поверхности катания и поверхности выкружки соответственно.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation / A.A. Yuriev, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, Yu.A. Rubannikova, M.D. Starostenkov, P.Y. Tabakov. Materials Research Forum LLC, 2021. 193 p.
2. Эволюция структурно-фазовых состояний металла рельсов при длительной эксплуатации / В.Е. Громов, О.А. Перегудов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, А.А. Юрьев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 164 с.
3. Формирование микроструктуры и рельсов при закалке и длительной эксплуатации / В.Е. Громов, К.В. Морозов, О.А. Перегудов, Ю.Ф. Иванов. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2017. 373 с.
4. Microstructure of quenched rails / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, A.B. Yuriev, K.V. Morozov. Cambridge. CISP Ltd, 2016. 153 p.
5. Ivanisenko Yu., MacLaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Shear-induced  $\alpha \rightarrow \gamma$  transformation in nanoscale Fe–C composite // Acta Mater. 2006. Vol. 54. P. 1659–1669.
6. 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. Vol. 581. P. 8–15.
7. 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. Vol. 49. No. 10. P. 947–952.
8. 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. In: Ultrafine Grained Materials IV. Ed. By Zhu E.T. et al. The Minerals, Metals & Materials Society. 2006. P. 1–6.
9. 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.
10. Кузнецов Р.В., Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Рубанникова Ю.А. Трансформация структурно-фазовых состояний в головке рельсов при экстремально длительной эксплуатации // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 4. С. 278–283.
11. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Кузнецов Р.В., Глезер А.М., Шлярова Ю.А., Перегудов О.А. Деформационное преобразование структуры и фазового состава поверхности рельсов при сверхдлительной эксплуатации // Деформация и разрушение материалов. 2022. № 1. С. 35–39.
12. Кузнецов Р.В., Перегудов О.А., Шляров В.В. Перераспределение атомов углерода в рельсах при сверхдлительной эксплуатации // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 2. С. 134–136.
13. 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 вузов. Физика. 2022. № 3. С. 160–165.
14. Кузнецов Р.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Кормышев В.Е., Шлярова Ю.А., Юрьев А.А. Градиенты структуры, фазового состава и дислокационной субструктуры рельсов при сверхдлительной эксплуатации // Известия Алтайского государственного университета. 2022. № 1. С. 44–50.
15. Григорович К.В., Григорович К.В., Громов В.Е., Кузнецов Р.В., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. Формирование тонкой структуры перлитной стали при сверхдлительной пластической деформации // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 503. С. 8–12.
16. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. Москва: Наука, 1977. 236 с.
17. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1978. 647 с.

#### 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., Peregudov O.A., Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Yur'ev A.A. *Evolution of structural-phase states of metal rails during*

- long-term operation*. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2017, 164 p. (In Russ.).
3. Gromov V.E., Morozov K.V., Peregudov O.A., Ivanov Yu.F. *Formation of microstructure and rails during quenching and long-term operation*. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2017, 373 p. (In Russ.).
  4. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yuriev A.B., Morozov K.V. *Microstructure of quenched rails*. Cambridge, CISP Ltd, 2016, 153 p.
  5. Ivanisenko Yu., MacLaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Shear-induced  $\alpha \rightarrow \gamma$  transformation in nanoscale Fe-C composite. *Acta Mater.* 2006, vol. 54, pp. 1659–1669.
  6. 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, vol. 581, pp. 8–15.
  7. 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, vol. 49, no. 10. P. 947–952.
  8. 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. In: *Ultrafine Grained Materials IV*. Ed. By Zhu E.T. et al. The Minerals, Metals & Materials Society. 2006, pp. 1–6.
  9. Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A., Kormyshev V.E., Yur'ev A.A., Popova N.A. Structural-phase state and hardening of rails after extremely long operation. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2021, vol. 18, no. 3, pp. 328–337. (In Russ.).
  10. Kuznetsov R.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A. Transformation of structural-phase states in the rail head during extremely long operation. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2022, vol. 65, no. 4, pp. 278–283. (In Russ.).
  11. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kuznetsov R.V., Glezer A.M., Shlyarova Yu.A., Peregudov O.A. Deformation transformation of the structure and phase composition of the rail surface during ultra-long operation. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2022, no. 1, pp. 35–39. (In Russ.).
  12. Kuznetsov R.V., Peregudov O.A., Shlyarov V.V. Redistribution of carbon atoms in rails during ultra-long operation. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2022, vol. 65, no. 2, pp. 134–136. (In Russ.).
  13. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kuznetsov R.V., Shlyarova Yu.A., Yur'ev A.A., Kormyshev V.E. Structure of rails after extremely long operation. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2022, no. 3, pp. 160–165. (In Russ.).
  14. Kuznetsov R.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kormyshev V.E., Shlyarova Yu.A., Yur'ev A.A. Gradients of structure, phase composition and dislocation substructure of rails during ultra-long operation. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2022, no. 1, pp. 44–50. (In Russ.).
  15. Grigorovich K.V., Grigorovich K.V., Gromov V.E., Kuznetsov R.V., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A. Formation of a fine structure of pearlitic steel under ultra-long plastic deformation. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki*. 2022, vol. 503, pp. 8–12. (In Russ.).
  16. Kurdymov V.G., Utevskii L.M., Entin R.I. *Transformations in iron and steel*. Moscow: Nauka, 1977, 236 p. (In Russ.).
  17. Gulyaev A.P. *Metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 647 p. (In Russ.).
- Сведения об авторах**
- Юрий Федорович Иванов**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН  
**Email:** yufi55@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0001-8022-7958
- Виктор Евгеньевич Громов**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет  
**Email:** gromov@physics.sibsiu.ru  
**ORCID:** 0000-0002-5147-5343
- Антон Алексеевич Юрьев**, к.т.н., менеджер по управлению продуктами и ресурсами, АО «ЕВРАЗ – объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»  
**Email:** ant-yurev@yandex.ru  
**ORCID:** 0000-0002-5147-5343
- Михаил Олегович Ефимов**, соискатель кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет  
**Email:** moefimov@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0002-4890-3730
- Роман Владимирович Кузнецов**, соискатель кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет  
**Email:** mail@kuzmash.com  
**ORCID:** 0000-0003-1024-1572
- Ирина Алексеевна Панченко**, к.т.н., заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработ-

ки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

**Email:** i.r.i.ss@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0002-1631-9644

#### Information about the authors

**Yurii F. Ivanov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS

**Email:** yufi55@mail.ru

**ORCID:** 0000-0001-8022-7958

**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

**Anton A. Yuriev**, Cand. Sci. (Eng.), Manager of Product and Resource Management, JSC «EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant»

**Email:** ant-yurev@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0002-5147-5343

**Mikhail O. Efimov**, Applicant of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

**Email:** moefimov@mail.ru

**ORCID:** 0000-0002-4890-3730

**Roman V. Kuznetsov**, Applicant of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

**Email:** mail@kuzmash.com

**ORCID:** 0000-0003-1024-1572

**Irina A. Panchenko**, Cand. Sci. (Eng.), Chief of Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

**Email:** i.r.i.ss@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0002-1631-9644

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 19.07.2022

После доработки 07.09.2022

Принята к публикации 12.09.2022

Received 19.07.2022

Revised 07.09.2022

Accepted 12.09.2022