

УДК 669.539.382:669.17

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ РЕЛЬСОВ НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Р. В. Кузнецов<sup>1</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>2</sup>, Ю. А. Шлярова<sup>1</sup>, К. В. Аксёнова<sup>1</sup>, В. Е. Кормышев<sup>1</sup>

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

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

**Аннотация.** Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии исследовано изменение структурно-фазовых состояний дифференцированно закаленных 100-м рельсов на различной (до 10 мм) глубине в головке рельсов по центральной оси и по выкружке в исходном состоянии и после разных сроков длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 691,8, 1411 и 1770 млн т брутто). Отмечено значительное преобразование структурно-фазового состояния зерен пластинчатого перлита: происходит разрушение пластин цементита путем их разрезания движущимися дислокациями и путем растворения с выходом углерода из решетки цементита на линии дислокаций, малоугловые и большеугловые границы. Выявлено формирование субзеренной структуры, содержащей наноразмерные частицы цементита, расположенные в стыках и вдоль границ субзерен. Выявлен градиентный характер изменения скалярной и избыточной плотности дислокаций по сечению головки рельсов.

**Ключевые слова:** структура, рельсы, длительная эксплуатация, разрушение, дислокации

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-32-60001) и стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов (проект СП-4517.2021.1).

**Для цитирования.** Кузнецов Р.В., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А., Аксёнова К.В., Кормышев В.Е. Изменение структурно-фазовых состояний рельсов на разных этапах длительной эксплуатации // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2021. № 3 (37). С. 20 – 26.

## CHANGE OF STRUCTURAL-PHASE STATES OF RAILS AT DIFFERENT STAGES OF LONG-TERM OPERATION

R. V. Kuznetsov<sup>1</sup>, Yu. F. Ivanov<sup>2</sup>, Yu. A. Shlyarova<sup>1</sup>, K. V. Aksenova<sup>1</sup>, V. E. Kormyshev<sup>1</sup>

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

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

**Abstract.** Structure-phase state of 100-meter differentially quenched rails at different depth up to 10 mm in rail head along the central axis and fillet symmetry axis in initial state and after different time periods of extreme long-term operation (passed tonnage of 691.8; 1411 and 1770 million. gross tons) has been studied using methods of transmission electron diffraction microscopy. Significant transformation of structural-phase state of lamellar pearlite grains is noted, accompanied by destruction of cementite plates by cutting them with moving dislocations and by dissolving with carbon withdrawal from the cementite lattice at dislocation lines, low-angle and high-angle boundaries. Formation of a subgrain structure containing nanosize cementite particles located at joints and along the boundaries of subgrains was revealed. Gradient character of scalar and excess density of dislocations along the section of the rail head is revealed.

**Keywords:** structure, rails, long-term operation, destruction, dislocation

**Funding.** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-32-60001) and scholarship of the President of the Russian Federation for young scientists and graduate students (project SP-4517.2021.1).

**For citation:** Kuznetsov R.V., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A., Aksenova K.V., Kormyshev V.E. The process of stationary creep of aluminum A85, titanium VT1-0, lead C2. *Bulletin of SibSIU*. 2021, no. 3 (37), p. 20–26. (In Russ.).

### **Введение**

В связи со значительным увеличением интенсивности железнодорожных перевозок и грузонапряженности в последние годы в научной литературе подробно обсуждаются вопросы, касающиеся упрочнения и износа рельсов, обеспечения их высокой эксплуатационной стойкости. Дефекты износа формируются в поверхностных слоях, при этом начало постоянного износа совпадает с накоплением определенного уровня пластической деформации [1–5].

Анализ износа рельсов и причин деградации их структуры в процессе длительной эксплуатации с последующим изъятием вызывают значительный научный и практический интерес. Изучение закономерностей и природы формирования структурно-фазовых состояний, дефектной субструктуры и свойств поверхностных слоев в головке рельсов по выкружке и по центральной оси после различных этапов (времени) наработки необходимо для создания рельсов премиум класса [6].

Ранее в российских объемно закаленных 25-м рельсах производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») после пропущенного тоннажа 500 и 1000 млн т было выявлено формирование наноразмерной многофазной структуры в слое металла, прилегающем к рабочей поверхности (поверхности выкружки и поверхности катания). Эта структура характеризуется полным разрушением колоний пластинчатого перлита (поверхностный слой), протеканием начальной стадии динамической рекристаллизации зерен структурно свободного феррита (слой толщиной не менее 2 мм), фрагментацией зерен феррито-карбидной смеси. В результате шло образование структуры, в которой частицы карбидной фазы расположены преимущественно по границам субзерен [7].

Партия дифференцированно закаленных 100-м рельсов категории ДТ350, выпущенных на этом комбинате в 2013 г., достигла беспрецедентной в практике наработки 1,77 млрд т брутто пропущенного тоннажа. Такая величина наработки более чем в два раза превышает ресурс рельсов до капитального ремонта пути с полной сменой рельсов.

Целью настоящей работы является анализ изменения структурно-фазовых состояний и де-

фектной субструктуры дифференцированно закаленных рельсов на разных стадиях длительной эксплуатации.

### **Материал и методика исследования**

В качестве материала исследования использовали четыре партии образцов дифференцированно термоупрочненных рельсов типа Р65 категории ДТ350 из электростали марки Э76ХФ, изготовленных в мае 2013 г. на АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Первую партию составляли образцы в исходном состоянии (перед установкой на полигоне), вторую, третью и четвертую партии – образцы после пропущенного тоннажа 691,8, 1411 и 1770 млн т брутто в процессе полигонных испытаний.

Химический состав стали марки Э76ХФ (ТУ 0921-276-01124323 – 2012) следующий: 0,73 % С; 0,75 % Мп; 0,58 % Si; 0,012 % Р; 0,007 % S; 0,42 % Cr; 0,07 % Ni; 0,13 % Cu; 0,002 % Al; 0,003 % Ti; 0,006 % Mo; 0,04 % V.

Исследования структуры стали осуществляли с использованием просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (ПЭМ) [8, 9]. Объекты исследования для ПЭМ (фольги толщиной 150 – 200 нм) изготавливали методом электролитического утонения пластинок, вырезанных методом электроискровой эрозии металла и расположенных у поверхностей катания и выкружки на расстоянии 2 и 10 мм от поверхности.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Дифференцированная закалка рельсов сопровождается формированием поликристаллической структуры, представленной зернами перлита пластинчатой морфологии, зернами перлита выроденного (феррито-карбидная смесь) и зернами структурно-свободного феррита (зерна феррита, не содержащие частицы цементита). Основной структурной составляющей стали является перлит пластинчатый, относительное содержание зерен структурно-свободного феррита незначительно и изменяется в пределах от 0,01 до 0,05 структуры стали. Относительное содержание зерен пластинчатого перлита вдоль центральной оси рельсов изменяется от 0,70 до 0,84. Вдоль оси симметрии выкружки относительное содержание зерен пластинчатого перлита изменяется в пределах от 0,61 до 0,73, достигая максимального значения на глубине 10 мм. Соответственно

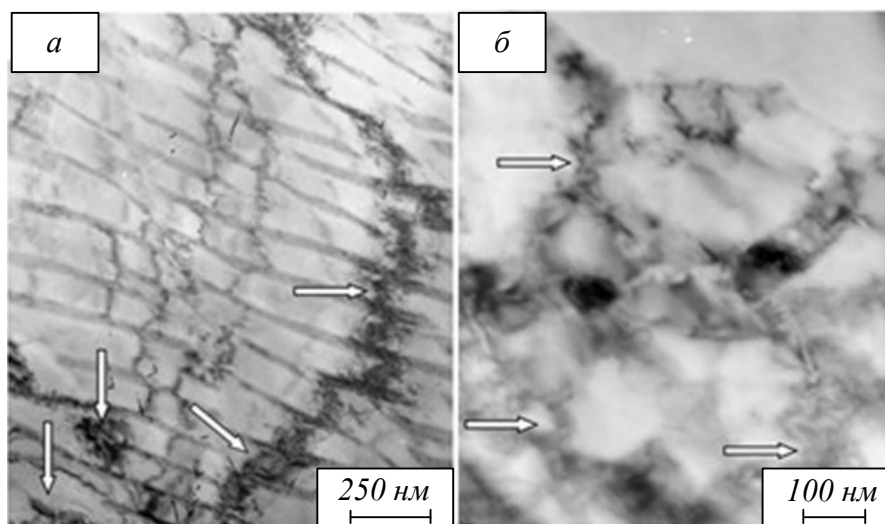


Рис. 1. Изгибные экстинкционные контуры (указаны стрелками), выявленные в структуре пластинчатого перлита (а) и зернах феррито-карбидной смеси (б)

Fig. 1. Flexural extinction contours (indicated by arrows) revealed in structure of lamellar pearlite (a) and grains of ferrite-carbide mixture (b)

этому изменяется относительное содержание зерен вырожденного перлита.

Дисперсность (межпластинчатое расстояние) пластинчатого перлита зависит от расстояния до поверхности. На глубине 2 и 10 мм средняя величина межпластинчатого расстояния практически не зависит от направления исследования (вдоль оси симметрии выкружки или вдоль центральной оси) и составляет 130 – 140 нм. В слое, формирующем поверхность катания, средняя величина межпластинчатого расстояния 160 нм, а в слое, формирующем поверхность выкружки, – 185 нм.

Скалярная плотность дислокаций практически не зависит от расстояния до поверхности головки рельса и изменяется в пределах  $(4,0 \div 4,6) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  в зернах перлита пластинчатого и  $(5,0 \div 6,0) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  – в зернах вырожденного перлита. Избыточная плотность дислокаций в зернах пластинчатого перлита изменяется в пределах  $(2,7 \div 3,4) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , в зернах перлита вырожденного изменяется в пределах  $(3,8 \div 5,2) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и убывает при удалении от поверхности головки.

После длительной эксплуатации в поверхностном слое рельсов формируется градиентная структура, проявляющаяся в существенной ее деградации вдоль центральной оси и вдоль оси симметрии рабочей выкружки головки рельсов.

Уже при пропущенном тоннаже 691,8 млн т по всему сечению головки рельсов наблюдается образование изгибных контуров экстинкции (рис. 1), свидетельствующих об упругопластическом деформировании кристаллической решетки [10]. Эти процессы происходят не только на поверхности катания, но и в глубине, поэтому

напряженно-деформированное состояние наблюдается по всему сечению головки рельса.

Эксплуатация рельсов сопровождается одновременным протеканием ряда процессов, основные из которых представлены ниже.

1. При пропущенном тоннаже 691,8 млн т происходит небольшой рост скалярной плотности дислокаций от  $2,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (в слое, расположенном на расстоянии 10 мм от поверхности) до  $3,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (около поверхности катания). При этом тип дислокационной субструктуры (сетчатые и хаотически распределенные дислокации) не изменяется. Примерное равенство этой характеристики вблизи поверхности катания и значительном удалении от нее свидетельствует о преимущественно упругом характере деформирования материала.

2. Разрушение структуры пластинчатого перлита путем перерезания пластин цементита с последующим «растаскиванием» их фрагментов. Разрушение пластин цементита приводит к формированию частиц глобулярной формы, поперечные и продольные размеры которых в поверхностном слое составляют 30 и 50 нм. При удалении от поверхности катания размеры наблюдаемых частиц увеличиваются и составляют  $30 \times 215 \text{ нм}$  на расстоянии 10 мм от поверхности катания (что близко к размерам частиц стали в недеформированном материале). Рефлексы карбидной фазы на микроэлектронограмме, полученной с таких пластин, имеют как радиальное, так и азимутальное размытие, что может свидетельствовать о высоком уровне дефектности кристаллической решетки цементита, а также об изменении параметра кристаллической решетки вследствие ухода атомов углерода.

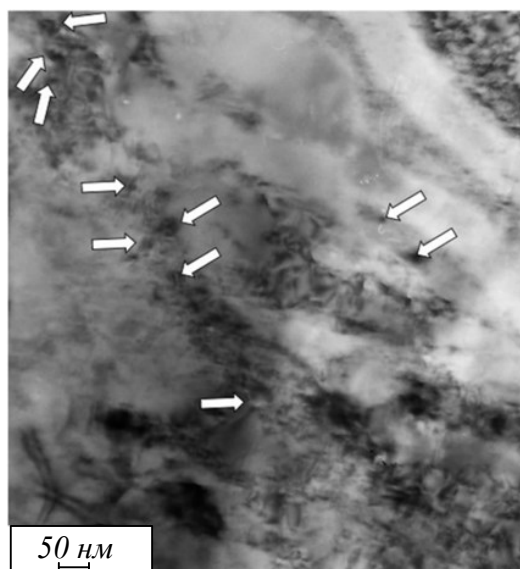


Рис. 2. ПЭМ изображение третьей стадии процесса преобразования пластин цементита перлитной колонии, реализующейся по механизму растворения на месте (стрелками указаны наноразмерные частицы карбидной фазы, формирующиеся в структуре пластин цементита)

Fig. 2. TEM image of the third stage of the process of pearlite colony cementite plates transformation, by onsite dissolution (arrows indicate nanosize particles of the carbide phase formed in structure of cementite plates)

Второй механизм разрушения пластин 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). Диффузия углерода протекает в поле напряжений, создаваемом дислокационной субструктурой, которая формируется вокруг пластины цементита. При этом степень распада цементита должна определяться

типом субструктуры и величиной плотности дислокаций.

На начальной стадии преобразования цементитные пластины окружаются скользящими дислокациями, после чего происходит разбиение пластин на отдельные слаботориентированные фрагменты. Далее вследствие вытягивания атомов углерода из решетки цементита может наблюдаться изменение структуры карбида, что обусловлено проникновением скользящих дислокаций из кристаллической решетки феррита в кристаллическую решетку цементита. На следующем этапе растворения цементита весь ранее занимаемый цементитной пластиной объем заполняется наноразмерными частицами (рис. 2).

Наибольшее преобразование структуры наблюдается в поверхностном слое головки рельсов. Структура поверхностного слоя рабочей выкружки после пропущенного тоннажа 1411 млн т брутто приведена на рис. 3, а, б, поверхности катания – на рис. 3, в. В обоих случаях на поверхности формируется субмикро- и нанокристаллическая субзеренная (фрагментированная) структура, относительное содержание которой в поверхностном слое рабочей выкружки составляет 0,25, в поверхностном слое поверхности катания – 0,15. Размеры фрагментов на поверхности выкружки изменяются в пределах 30 – 40 нм (рис. 3, б), а на поверхности катания – 150 – 300 нм (рис. 3, в).

После 1770 млн т пропущенного тоннажа выявлено формирование субзеренной структуры, которая формируется исключительно в поверхностном слое металла рельсов, при этом ее относительное содержание в поверхностном слое выкружки значительно выше, чем в поверхностном слое поверхности катания. Субзеренная структура содержит расположенные в стыках и вдоль

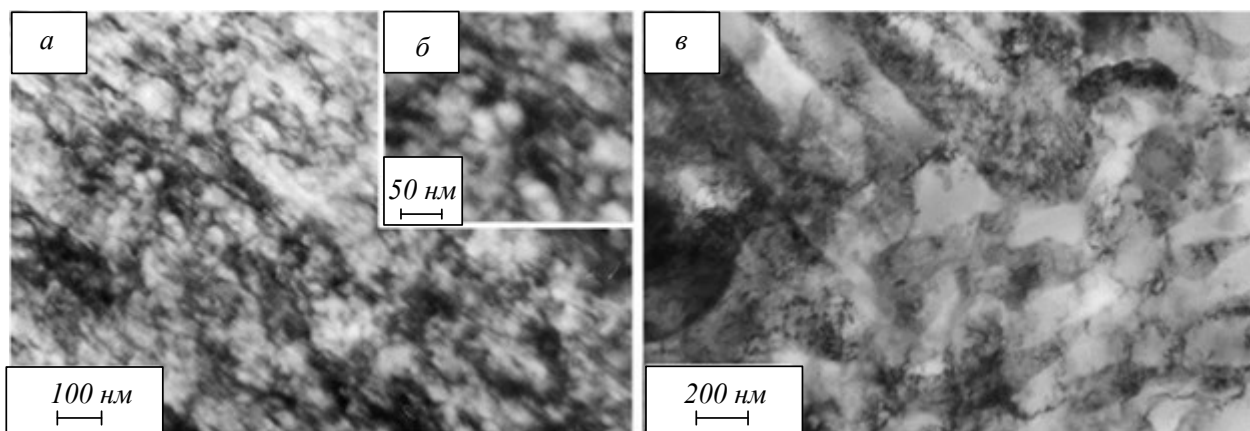


Рис. 3. ПЭМ изображения структуры, формирующейся после пропущенного тоннажа 1411 млн т брутто в поверхностном слое рабочей выкружки (а, б) и поверхности катания (в)

Fig. 3. TEM images of the structure formed after passed tonnage of 1411 million gross tons in the surface layer of working fillet (a, б) and in rolling surface (в)

границ субзерен наноразмерные частицы цементита. Размеры субзерен изменяются от 110 до 200 нм, размеры частиц цементита – от 25 до 60 нм. Преобразование при эксплуатации структуры перлита пластинчатой морфологии относительно центральной оси протекает медленнее по сравнению с изменением структуры рабочей выкружки.

3. Установлено одновременное с разрушением колоний перлита (при пропущенном тоннаже 691, 8 млн т) снижение объемной доли цементита от 4,9 % (в поверхностном слое) до 11,2 % (в слое, расположенном на глубине 10 мм).

Увеличение пропущенного тоннажа до 1411 и 1770 млн т усиливает процессы изменения структурно-фазовых состояний металла рельсов. По центральной оси растут микроискажения и параметр кристаллической решетки твердого раствора на основе  $\alpha$ -Fe. Деформационный наклеп металла поверхностного слоя на глубину до 200 мкм при пропущенном тоннаже 1411 млн т приводит к увеличению в 1,5 раза относительно исходного состояния скалярной и избыточной плотностей дислокаций [6].

Проведенное исследование градиентного характера изменения структуры металла рельсов показало, что эксплуатация рельсов сопровождается закономерным снижением количества пластинчатого перлита (по мере приближения к поверхности) и увеличением относительного содержания разрушенного перлита. При пропущенном тоннаже 1770 млн т в поверхностном слое весь пластинчатый перлит практически разрушен.

4. После длительной эксплуатации рельсов местами расположения углерода наряду с частицами цементита становятся дефекты кристаллической структуры стали (дислокации, границы зерен и субзерен), а в поверхностном слое углерод обнаруживается и в кристаллической решетке  $\alpha$ -железа. Процессы деградации карбидной фазы и перераспределения атомов углерода наиболее интенсивно реализуются в поверхностных слоях глубиной до 2 мм. Увеличение пропущенного тоннажа в интервале  $691,8 \div 1411 \div 1770$  млн т также сопровождается заметным перемещением атомов углерода на дефекты структуры стали в рабочей выкружке по сравнению с поверхностью катания.

Исходя из представленных результатов, можно предположить, что разрушение металла рельсов в первую очередь будет протекать именно в поверхностном слое рабочей выкружки, где уже после 1411 млн т пропущенного тоннажа наблюдается формирование наноразмерной субзеренной структуры.

Значительное фрагментирование структуры зерен после пропущенного тоннажа 1411 – 1770 млн т при-

водит к формированию локальных участков, не способных далее обеспечивать развитие релаксационных процессов (формируется так называемая «критическая» структура [11]). Формирование такой «критической» структуры будет завершаться зарождением микротрещин по усталостному механизму и выходу рельсов из строя. Поэтому увеличение ресурса работы рельсов может быть достигнуто за счет как можно более длительного сохранения структуры, способной к развитию обратимых деформационных процессов, исключающих разрушение цементитных пластин, перемещение атомов углерода на дефекты решетки  $\alpha$ -железа.

### **Выводы**

Методами современного физического материаловедения выполнен анализ изменения структурно-фазового состояния и дефектной субструктуры по различным направлениям на глубине до 10 мм в головке длинномерных дифференцированно закаленных рельсов после различных сроков длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 691,8, 1411 и 1770 млн т брутто).

Выявлено существенное преобразование структурно-фазового состояния зерен пластинчатого перлита, сопровождающееся разрушением пластин цементита путем их разрезания движущимися дислокациями и растворением с уходом углерода из решетки цементита на линии дислокаций, малоугловые и большеугловые границы. Установлено, что преобразование структуры пластинчатого перлита протекает более интенсивно в поверхности выкружки по сравнению с поверхностью катания. В наибольшей степени это наблюдается в поверхностном слое, где формируется фрагментированная структура и выделяются наноразмерные частицы цементита.

При наработке 1411 млн т пропущенного тоннажа размеры фрагментов феррита в поверхностном слое выкружки изменяются в пределах 30 – 40 нм, а в поверхностном слое поверхности катания – 150 – 300 нм. Относительное содержание зерен с фрагментами составляет 25 % (в поверхностном слое выкружки) и 15 % (в поверхностном слое поверхности катания). При пропущенном тоннаже 1770 млн т в поверхностном слое пластинчатый перлит практически разрушается.

Показано, что длительная эксплуатация рельсов сопровождается существенным перераспределением атомов углерода, наиболее интенсивно происходящем в поверхностных слоях толщиной до 2 мм. В исходном состоянии основное количество атомов углерода сосредоточено в частицах цементита. После длительной эксплуа-

тации рельсов атомы углерода располагаются (наряду с частицами цементита) в дефектах кристаллической структуры стали (в дислокациях, границах зерен и субзерен). При увеличении пропущенного тоннажа атомы углерода перемещаются преимущественно в места скопления дефектов структуры в рабочей выкружке по сравнению с поверхностью катания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanisenko Yu., Maclaren I., Souvage X., Valiev R.Z., Fecht H.J. Shear-induced  $\alpha \rightarrow \gamma$  transformation in nanoscale Fe-C composite // *Acta Materialia*. 2006. Vol. 54. P. 1659–1669.
2. Seo J.-W., Jun H.-K., Kwon S.-J., Lee D.-H. Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling – sliding contact // *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 83. P. 184–194.
3. Lewis R., Christoforou P., Wang W.J., Beagles A., Burstow M., Lewis S.R. Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project) // *Wear*. 2019. Vol. 430-431. P. 383–392.
4. Skrypnyk R., Ekh M., Nielsen J.C.O., Pålsson B.A. Prediction of plastic deformation and wear in railway crossings – comparing the performance of two rail steel grades // *Wear*. 2019. Vol. 428-429. P. 302–314.
5. Kim D., Quagliato L., Park D., Kim N. Lifetime prediction of linear slide rails based on surface abrasion and rolling contact fatigue-induced damage // *Wear*. 2019. Vol. 420-421. P. 184–194.
6. 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. In book: *Materials Research Forum LLC*, 2021. 193 p.
7. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Glezer A.M., Peregudov O.A., Morozov K.V. Nature of the structural degradation of rail surfaces during operation // *Bulletin of Russian Academy of Science: Physics*. 2016. No. 80 (12). P. 1483–1488.
8. Zuo J.M., Spence J.C.H. *Advanced Transmission Electron Microscopy*. New York: Springer, 2017. 729 p.
9. Egerton F.R. *Physical principles of electron microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016. 196 p.
10. Конева Н.А., Козлов Э.В. Природа субструктурного упрочнения // *Известия вузов. Физика*. 1982. Т. 8. № 3. С. 13, 14.
11. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.

### REFERENCES

1. Ivanisenko Yu., Maclaren I., Souvage X., Valiev R.Z., Fecht H.J. Shear-induced  $\alpha \rightarrow \gamma$  transformation in nanoscale Fe-C composite. *Acta Materialia*. 2006, vol. 54, pp. 1659–1669.
2. Seo J.-W., Jun H.-K., Kwon S.-J., Lee D.-H. Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling – sliding contact. *International Journal of Fatigue*. 2016, vol. 83, pp. 184–194.
3. Lewis R., Christoforou P., Wang W.J., Beagles A., Burstow M., Lewis S.R. Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project). *Wear*. 2019, vol. 430-431, pp. 383–392.
4. Skrypnyk R., Ekh M., Nielsen J.C.O., Pålsson B.A. Prediction of plastic deformation and wear in railway crossings – comparing the performance of two rail steel grades. *Wear*. 2019, vol. 428-429, pp. 302–314.
5. Kim D., Quagliato L., Park D., Kim N. Lifetime prediction of linear slide rails based on surface abrasion and rolling contact fatigue-induced damage. *Wear*. 2019, vol. 420-421, pp. 184–194.
6. 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. In: *Materials Research Forum LLC*, 2021, 193 p.
7. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Glezer A.M., Peregudov O.A., Morozov K.V. Nature of the structural degradation of rail surfaces during operation. *Bulletin of Russian Academy of Science: Physics*. 2016, no. 80 (12), pp. 1483–1488.
8. Zuo J.M., Spence J.C.H. *Advanced Transmission Electron Microscopy*. New York: Springer, 2017, 729 p.
9. Egerton F.R. *Physical principles of electron microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016, 196 p.
10. Koneva N.A., Kozlov Je.V. The nature of substructural hardening. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 1982, vol. 8, no. 3, pp. 13, 14. (In Russ.).
11. Rybin V.V. *Large plastic deformation and destruction of metals*. Moscow: Metallurgiya, 1986, 224 c.

### Сведения об авторах

**Роман Вадимович Кузнецов**, соискатель кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** mail@kuzmash.com

**Юрий Федорович Иванов**, д.ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник, Институт Сильноточной электроники СО РАН  
**E-mail:** yufi55@mail.ru

**Юлия Андреевна Шлярова**, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** rubannikova96@mail.ru

**Крестина Владимировна Аксёнова**, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** 19krestik91@mail.ru

**Василий Евгеньевич Кормышев**, к.т.н., старший научный сотрудник УНИ, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** 89239230000@mail.ru

### Information about the authors

**Roman V. Kuznetsov**, External doctorate student of the Chair of Natural Sciences. Named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University  
**E-mail:** mail@kuzmash.com

**Yurii F. Ivanov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher, Institute of High-Current Electronics SB RAS  
**E-mail:** yufi55@mail.ru

**Yuliya A. Shlyarova**, doctorate student of the Chair of Natural Sciences. Named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University  
**E-mail:** rubannikova96@mail.ru

**Krestina V. Aksenova**, Cand. Sci. (Eng.), Cand. Sci. Eng., Associate Professor of the Chair of Natural Sciences. Named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University  
**E-mail:** 19krestik91@mail.ru

**Vasilii E. Kormyshev**, Cand. Sci. (Eng.), Cand. Sci. Eng., Senior researcher of the Research department, Siberian State Industrial University  
**E-mail:** 89239230000@mail.ru

© 2021 г. *Р.В. Кузнецов, Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Шлярова, К.В. Аксёнова, В.Е. Кормышев*  
Поступила в редакцию 30.06.2021 г.