

Градиенты структуры, фазового состава и дислокационной субструктурой рельсов при сверхдлительной эксплуатации*

Р.В. Кузнецов¹, В.Е. Громов¹, Ю.Ф. Иванов², В.Е. Кормышев¹, Ю.А. Шлярова¹, А.А. Юрьев³

¹Сибирский государственный индустриальный университет
(Новокузнецк, Россия)

²Институт сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия)

³АО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
(Новокузнецк, Россия)

Gradients of Structure, Phase Composition, and Dislocation Substructure of Rails under the Ultra Long-Term Operation

R.V. Kuznetsov¹, V.E. Gromov¹, Yu.F. Ivanov², V.E. Kormyshev¹, Yu.A. Shliarova¹, A.A. Yuriev³

¹Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Russia)

²Institute of High-Current Electronics SB RAS (Tomsk, Russia)

³JSC «EVRAZ Consolidated West Siberian Metallurgical Plant»
(Novokuznetsk, Russia)

С использованием методов современного физического материаловедения изучены структура, фазовый состав, дислокационная субструктура и перераспределение углерода в дифференцированно закаленных 100-метровых рельсах после сверхдлительной эксплуатации (пропущенный тоннаж с 2013 г. — 1770 млн т брутто). В сечении головки рельсов по центральной оси симметрии и радиуса скругления выкружки на расстояниях 0, 2, 10 мм от поверхности выявлены закономерности изменения основных параметров: относительного содержания различных морфологических разновидностей структуры, скалярной и избыточной плотности дислокаций, объемной доли цементита, перераспределения атомов углерода. Высказано предположение, что снижение объемной доли карбидной фазы в поверхностном слое головки может быть связано с обезуглероживанием и выходом атомов углерода на дефекты структуры стали. Отмечено, что преобразования вдоль центральной оси протекают значительно медленнее по сравнению с изменением относительно радиуса скругления выкружки.

Ключевые слова: рельсы, структура, фазовый состав, сверхдлительная эксплуатация.

DOI: 10.14258/izvasu(2022)1-06

Введение

При эксплуатации рельсов в поверхностных слоях происходят различные процессы, сопровождающиеся ухудшением механических свойств и приводящие к выходу рельсов из строя [1–3]. Этому уделяется са-

In this paper, the structure, phase composition, dislocation substructure, and carbon redistribution in differentially quenched 100-meter rails after the ultra long-term operation (passed gross tonnage since 2013 — 1770 mln. tons) are studied using modern materials science and engineering approaches. The regularities of main parameters variations, such as changes in a relative variety of different morphological structures, scalar and excessive dislocation density, volume fractions of cementite, and redistribution of carbon atoms, are identified at the rail head cross section along the central axis and fillet rounding radius at the distances of 0, 2, 10 mm from the surface. It is suggested that the decrease of volume fraction of carbide phase in head surface layer can be related to the decarburization and appearance of carbon atoms at the steel structure defects. It is noted that transformations along the central axis proceed slower in relation to changes of the rounding radius of the fillet.

Keywords: rails, structure, phase composition, ultra long-term operation.

мое пристальное внимание в последних работах зарубежных исследователей [4–9].

Для российских объемно-закаленных 25-метровых рельсов в работах [2, 10] сформирован банк данных о закономерностях формирования структуры,

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

фазового состава, дефектной субструктуры и поверхности разрушения в головке рельсов после длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 500 и 1000 млн т брутто). Методами современного физического материаловедения проведены исследования структурно-фазовых состояний и свойств, формирующихся на различных расстояниях по центральной оси и по выкружке в головке дифференцированно закаленных рельсов после пропущенного тоннажа 691,8 [11] и 1411 млн т брутто [1, 12].

Целью настоящей работы является исследование структуры, фазового состава, дефектной субструктуры, распределения углерода и оценка механизмов упрочнения по сечению головки 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов после сверхдлительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 1770 млн т брутто).

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использованы рельсы категории ДТ350, изъятые из пути на Экспериментальном кольце РЖД после пропуска

1770 млн т брутто. Рельсы сертифицированной партии были изготовлены на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» в июне 2013 г. в соответствии с требованиями ТУ 0921-276-01124323-2012 и дифференцированно термоупрочнены. По химическому составу металл рельсовой пробы удовлетворяет этим требованиям.

Исследования структуры стали проводили, используя методы оптической микроскопии (микровизор металлографический μ Vizo-MET-221P), сканирующей электронной микроскопии (MIRA3 Tesan), рентгеноструктурного анализа (рентгеновский дифрактометр XRD-7000S (Shimadzu, Япония)) и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор ЭМ-125) [13–15]. Объекты исследования для просвечивающей электронной микроскопии (фольги толщиной 150–200 нм) изготавливали методами электролитического утонения пластинок, расположенных у поверхностей катания и выкружки и на расстоянии 2 мм и 10 мм от поверхности, вырезанных методами электроискровой эрозии металла. Схема препарирования образца приведена на рисунке 1.

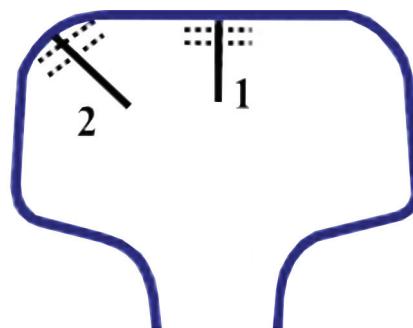


Рис. 1. Схема препарирования образца рельса при исследовании его структуры методами оптической и электронной дифракционной микроскопии. Сплошными линиями выделены направления по центральной оси (1) и по выкружке (2); пунктирными линиями условно указаны места расположения слоев металла, использованных для подготовки фольг (расстояние 2, 10 мм от поверхности)

Результаты и их обсуждение

Структурно-фазовое состояние рельсов на глубине 10 мм

Установлено, что независимо от направления исследования (по радиусу скругления выкружки или вдоль центральной оси головки) в стали присутствует несколько структурных состояний перлита.

Во-первых, собственно структура перлита пластинчатой морфологии, характерной особенностью которого является чередование параллельно расположенных пластин цементита и феррита. Довольно часто пластины цементита перлитных колоний искривлены. Присутствуют колонии перлита, в которых пластины цементита разделены ферритными промежутками (так называемыми ферритными мостиками [16]). Во-вторых, зерна, в которых отсутствует пла-

стинчатое расположение феррита и цементита (вырожденный перлит).

Вдоль центральной оси относительное содержание зерен перлита пластинчатого составляет 0,70 структуры стали; вдоль радиуса скругления выкружки — 0,74 структуры стали; остальное — зерна вырожденного перлита и зерна феррита.

Зерна перлита характеризуются наличием дислокационной субструктуры. Дислокации наблюдаются преимущественно в пластинах феррита и расположены хаотически. Скалярная плотность дислокаций (обозначаемая далее по тексту $\langle\rho\rangle$), измеренная в объеме рельсов вдоль центральной оси, составляет $\langle\rho\rangle=2,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, вдоль радиуса скругления выкружки — $\langle\rho\rangle=3,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Электронно-микроскопические исследования структуры стали позволяют выявить и исследовать внутренние (дальнодействующие) поля напряжений, которые проявляются на электронно-микроскопических изображениях материала в виде изгибных контуров экстинкции [17–19]. Источниками полей напряжений могут являться внутрифазные границы раздела (границы зерен и субзерен одной фазы), межфазные границы раздела (для стали — границы раздела карбид / матрица), микротрещины, микропоры [20–26]. Используя методику, основанную на анализе изгибных контуров экстинкции [2, 27, 28], выявили, что избыточная плотность дислокаций вдоль центральной оси составляет $\rho_+ = 2,08 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, вдоль радиуса скругления выкружки — $\rho_\pm = 1,84 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Эксплуатация рельсов сопровождается деформационным преобразованием структуры перлита, приводящим к разрушению пластин цементита. В объеме стали, расположенном на расстоянии 10 мм от поверхности катания вдоль оси симметрии, объемная доля цементита составляет 10,4 %, что соответствует концентрации углерода в материале, равной 0,74 вес. %. В объеме стали, расположенном на расстоянии 10 мм от поверхности рабочей выкружки вдоль радиуса скругления, объемная доля цементита составляет

9,6 %, что соответствует концентрации углерода в материале, равной 0,69 вес. %.

Градиенты структурно-фазового состояния рельсов по разным направлениям

Для поверхностного слоя толщиной до 2 мм по радиусу скругления выкружки преобразование зерен перлита протекает следующим образом. Во-первых, выявляются зерна, сохранившие структуру пластинчатого перлита. Во-вторых, наблюдаются колонии перлита, пластины цементита в которых разбиваются на отдельные фрагменты, сдвинутые друг относительно друга. В-третьих, наблюдаются колонии перлита, пластины цементита в которых разделены на отдельные частицы округлой формы, декорирующие пластины феррита. Размеры данных частиц, имеющих глобулярную форму, изменяются в весьма широких пределах от 15 нм до 45 нм (рис. 2). В-четвертых, области материала, имеющие поликристаллическую структуру. Микроэлектронограмма, полученная с данной структуры, имеет кольцевое строение, что указывает на субмикро-наномасштабный размер кристаллитов. Размеры кристаллитов изменяются в пределах от 150 нм до 250 нм. На границах зерен феррита располагаются частицы карбидной фазы. Размеры частиц изменяются в пределах от 25 нм до 75 нм.

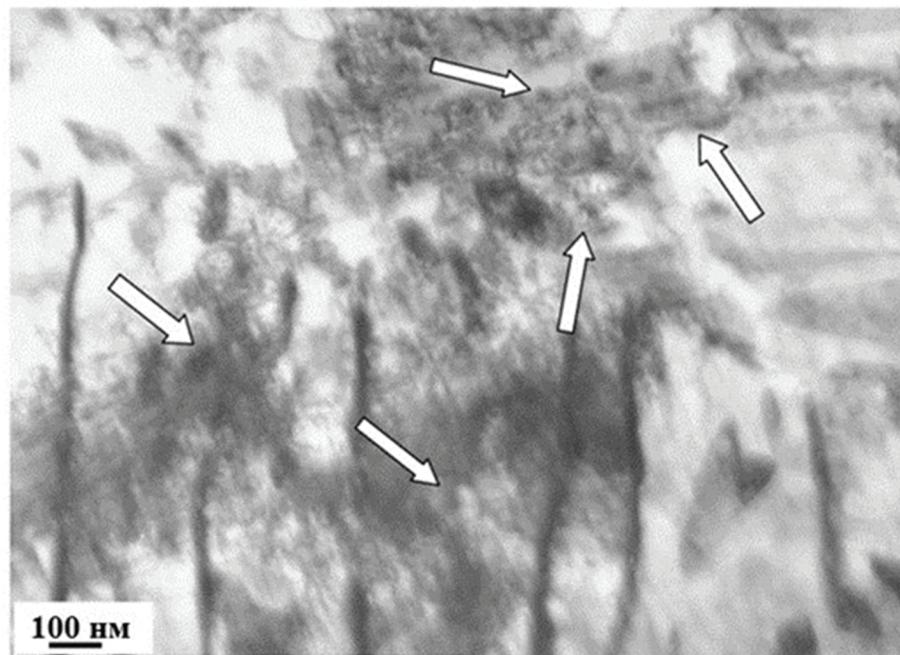


Рис. 2. Структура пластинчатого перлита металла рельсов на расстоянии 2 мм от поверхности рабочей выкружки. Стрелками указаны частицы цементита, расположенные на месте пластин цементита

Относительное содержание указанных выше морфологических разновидностей структуры металла

вдоль центральной оси симметрии и радиуса скругления рабочей выкружки представлено на рисунке 3.

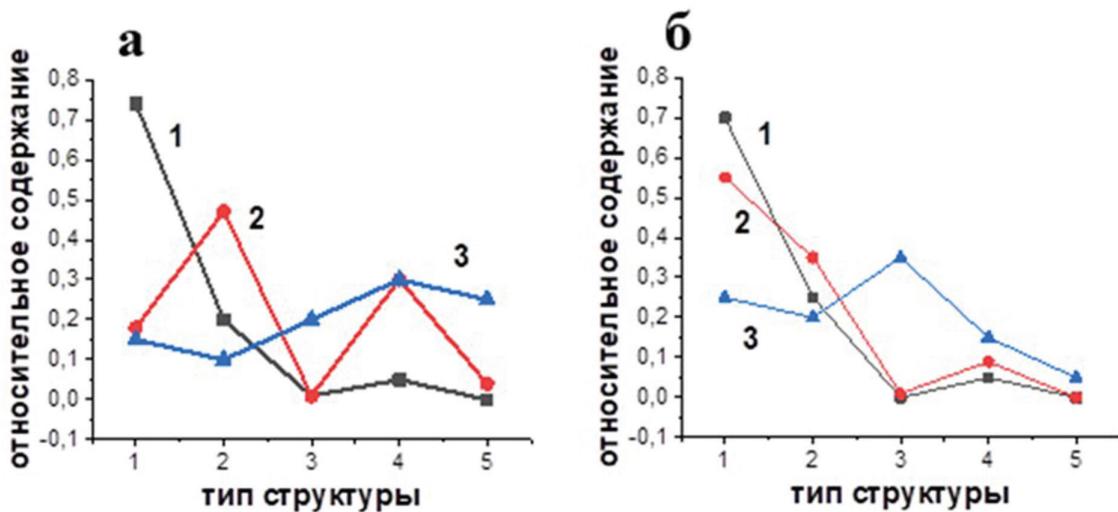


Рис. 3. Относительное содержание различных типов структуры металла головки рельсов, выявленных вдоль радиуса скругления рабочей выкружки (а) и вдоль центральной оси симметрии (б); кривая 1 — относительное содержание типов структуры в слое, расположенном на глубине 10 мм; 2 — в слое, расположенном на глубине 2 мм; 3 — в поверхностном слое. Обозначены следующие типы структуры: 1 — перлит пластинчатой морфологии; 2 — перлит разрушенный; 3 — вырожденный перлит (феррито-карбидная смесь); 4 — зерна перлита, пластины феррита в которых декорированы наноразмерными частицами цементита; 5 — зерна феррита с субмикрокристаллической зернисто-субзеренной структурой

Представленные на рисунке 4 результаты свидетельствуют о том, что $\langle \rho \rangle$ и ρ_{\pm} увеличиваются по мере

приближения к поверхности головки рельсов.

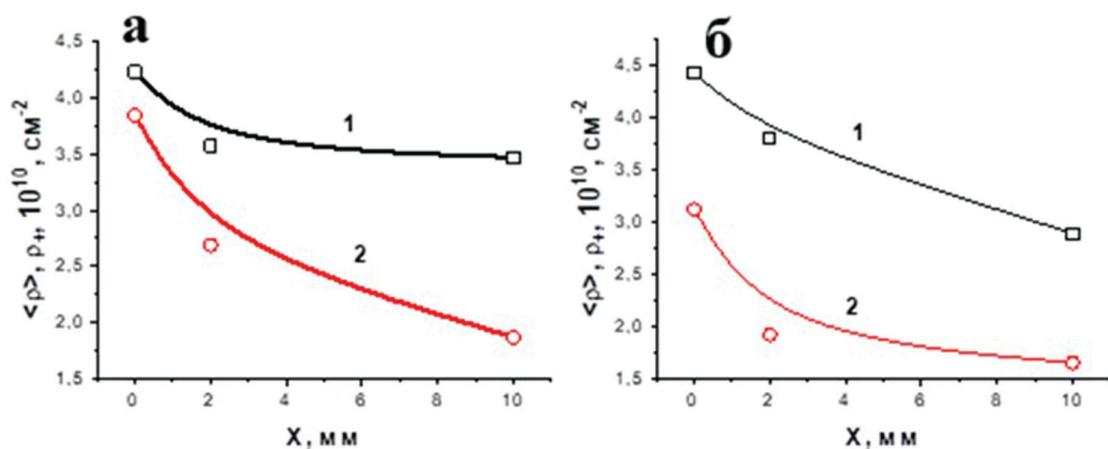


Рис. 4. Зависимость скалярной ($\langle \rho \rangle$, кривая 1) и избыточной (ρ_{\pm} , кривая 2) плотности дислокаций от расстояния от поверхности головки рельсов вдоль оси симметрии рабочей выкружки (а) и вдоль центральной оси симметрии (б)

Эксплуатация рельсов сопровождается разрушением пластин цементита. Выполненные оценки показали, что в объеме стали, расположенному на расстоянии 2 мм от поверхности рабочей выкружки вдоль радиуса скругления, объемная доля цементита составляет 3,6 %, а в объеме стали, формирующей поверх-

ность рабочей выкружки, объемная доля цементита составляет 3,1 %.

В [29] оценку количества атомов углерода, формирующих карбид железа состава Fe₃C, предложено проводить, используя выражение:

$$\Delta C(Fe_3C) = 0,07 * \Delta V, \quad (1)$$

где ΔV — объемная доля частиц карбидной фазы.

Выполненные оценки показывают, что после прошедшего тоннажа 1770 млн т концентрация углерода в объеме материала, расположенного на глубине 2 мм, равна 0,26 вес. %, а концентрация углерода в поверхностном слое рабочей выкружки составляет 0,22 вес. %.

Анализ структурно-фазового состояния поверхностного слоя до 2 мм по центральной оси выявил следующие морфологические типы перлитной структуры. Во-первых, обнаружены зерна, сохранившие структуру пластинчатого перлита. Во-вторых, наблюдаются колонии перлита, пластины цементита в которых разбиваются на отдельные фрагмен-

ты, сдвинутые друг относительно друга. В-третьих, наблюдаются колонии перлита, пластины цементита в которых разделены на отдельные частицы окружной формы. Как правило, такие частицы окружены большим количеством дислокаций. Размеры данных частиц в слое, примыкающем к поверхности катания, имеющих глобулярную форму, изменяются в пределах от 10 нм до 25 нм. По мере удаления от поверхности катания размеры таких частиц увеличиваются до (80–95) нм.

В-четвертых, области материала, содержащие так называемые каналы деформации [30]. В этом случае в пределах колонии пластинчатого перлита формируются протяженные области, в объеме которых на месте пластинчатой структуры образуется фрагментированная субструктура (рис. 5).

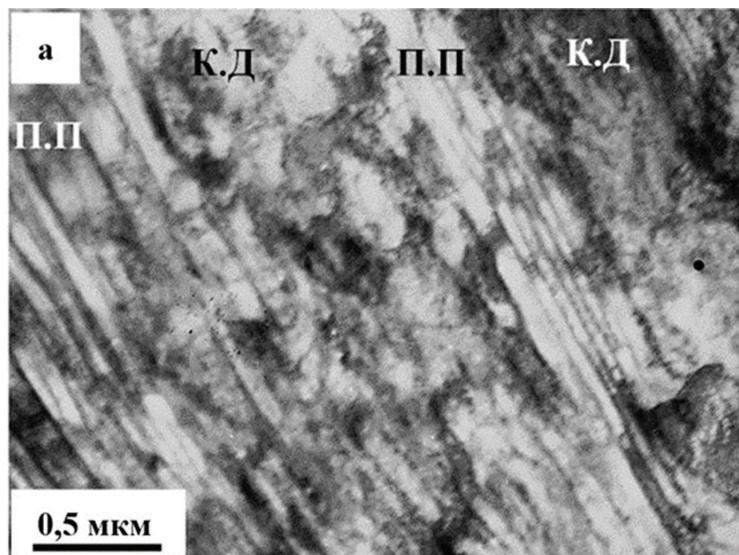


Рис. 5. Структура поверхностного слоя рабочей выкружки головки:
П.П. — пластинчатый перлит, К.Д. — канал деформации

В-пятых, области материала, имеющие субзеренную структуру. Размеры субзерен изменяются в пределах от 150 нм до 300 нм. На границах и в стыках границ субзерен феррита располагаются частицы карбидной фазы, имеющие глобулярную форму. Размеры частиц изменяются в пределах от 25 нм до 55 нм.

Из рисунков 3а и 3б следует, что, во-первых, преобразование в процессе эксплуатации структуры перлита пластинчатой морфологии относительно центральной оси протекает существенно медленнее по сравнению с изменением структуры относительно радиуса скругления рабочей выкружки. Во-вторых, зерено-субзеренная структура формируется исключительно в поверхностном слое головки. В-третьих, относительное содержание зерено-субзеренной структуры в поверхностном слое рабочей выкружки

в 5 раз выше, чем в поверхностном слое поверхности катания. В совокупности указанные факты свидетельствуют о существенно более высоком уровне деформационного преобразования головки вдоль радиуса рабочей выкружки по сравнению с металлом вдоль центральной оси.

Сопоставляя результаты, представленные на рисунке 4а (кривая 1) и рисунке 4б (кривая 1), можно отметить, что увеличение скалярной плотности дислокаций в поверхностном слое относительно слоя, расположенного на глубине 10 мм, измеренной вдоль центральной оси головки рельсов, составляет 21%; при измерении вдоль радиуса скругления рабочей выкружки составляет 52%. Следовательно, деформационное преобразование структуры металла более существенно в области рабочей выкружки.

Анализируя результаты, приведенные на рисунке 4а (кривая 2) и рисунке 4б (кривая 2), отметим, что величина избыточной плотности дислокаций ниже величины скалярной плотности дислокаций, независимо от места анализа структуры стали. Последнее указывает на упругий характер изгиба-кручения фольги. Величина избыточной плотности дислокаций, измеренная и вдоль центральной оси головки, и вдоль радиуса скругления рабочей выкружки в поверхностном слое, более чем в 2 раза превышает эту же характеристику, выявленную в слое, расположенным на глубине 10 мм.

В объеме стали, расположенном на расстоянии 2 мм от поверхности катания вдоль центральной оси симметрии головки, объемная доля цементита составляет 8,2 %, а в объеме стали, формирующей поверхностный слой поверхности катания, объемная доля цементита составляет 4,5 %.

Оценки количества атомов углерода, формирующих карбид железа состава Fe_3C , показывают, что в объеме материала, расположенного на глубине 2 мм вдоль центральной оси симметрии головки, оно равно — 0,59 вес. %, а концентрация углерода

в поверхностном слое поверхности катания составляет 0,32 вес.%.

Заключение

Методами современного физического материаловедения изучено изменение структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры, распределения углерода по сечению головки дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов ДТ350 после сверхдлительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 1770 млн т брутто). Показано, что эксплуатация рельсов сопровождается множественным преобразованием структуры головки рельсов по центральной оси и радиусу скругления выкружки. Отмечено существенное снижение объемной доли карбидной фазы в поверхностном слое головки. Высказано предположение, что это может быть обусловлено как обезуглероживанием поверхностного слоя, так и выходом атомов углерода на дефекты структуры — линии дислокации, границы зерен и субзерен. Установлен более высокий уровень деформационного преобразования структуры пластинчатого перлита в поверхностном слое рабочей выкружки по сравнению со структурой поверхности катания.

Библиографический список

1. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yuriev A.B., Morozov K.V. Microstructure of quenched rails. Cambridge: CISPLtd, 2016.
2. 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.
3. 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. № 4. DOI: 10.15407/ufm.21.04.527.
4. 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue2015.10.012>.
5. Gavriljuk V.G. Comment on “Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires” // Scripta Mater. 2001. Vol. 45. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)01185-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01185-X).
6. Li Y.J., Chai P., Bochers C., Westerkamp S., Goto S., Raabe D., Kirchheim R. Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite // Acta Mater. 2011. Vol. 59. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.03.022>.
7. Gavriljuk V.G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation // Mater. Sci. Eng. A. 2003. Vol. 345. URL: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00358-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00358-1).
8. Ning J.-li., Courtois-Manara E., Kormanaeva L., Ganeev A.V., Valiev R.Z., Kubel C., Ivanisenko Yu. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion // Mater. Sci. Eng. A. 2013. Vol. 581. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.05.008>.
9. Ivanisenko Yu., Maclare I., Souvage X., Valiev R.Z., Fecht H.J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe-C composite // Acta Mater. 2006. Vol. 54. No 6. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.11.034>.
10. Gromov V.E., Peregudov O.A., Ivanov Yu.F., Morozov K.V., Alsaraeva K.V., Semina O.A. Surface layer structure degradation of rails in prolonged operation // Journal of surface investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques. 2015. Vol. 9. No. 6. URL: <https://doi.org/10.1134/S1027451015060282>.
11. Gromov V.E., Yuriev A.A., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Konovalov S.V., Semin A.P., Sundeev R.V., Defect substructure change in 100-m differentially hardened rails in long-term operation // Materials Letters. 2017. Vol. 209. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.135>.
12. Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Yuriev A.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Structural phase states and properties of rails after long-term operation // Materials Letters. 2020. Vol. 268. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127499>.
13. Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. Basel, 2016.

14. Kumar C.S.S.R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. New York, 2014.
15. Carter C.B., Williams D.B. Transmission Electron Microscopy. Berlin, 2016.
16. Тушинский Л.И., Батаев А.А., Тихомирова Л.Б. Структура перлита и конструктивная прочность стали. Новосибирск, 1993.
17. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. М., 1973.
18. Томас Г., Гориндж М.Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. М., 1983.
19. Хирш П., Хови А., Николсон Р. и др. Электронная микроскопия тонких кристаллов. М., 1968.
20. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск : Наука, 1985.
21. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М., 1986.
22. Эшелби Дж. Континальная теория дислокаций. М., 1963.
23. Конева Н.А., Козлов Э.В. Природа субструктурного упрочнения // Известия вузов. Физика. 1982. № 8.
24. Владимиров В.И. Физическая теория прочности и пластичности. Точечные дефекты. Упрочнение и возраст. Л., 1975.
25. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. I. Дефекты решетки. М., 1999.
26. Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. М., 1977.
27. Конева Н.А., Козлов Э.В., Тришкина Л.И., Лычагин Д.В. Дальнодействующие поля напряжений, кривизна-кручение кристаллической решетки и стадии пластической деформации. Методы измерений и результаты // Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела : сб. трудов междунар. конф. Томск, 1990.
28. Конева Н.А., Козлов Э.В., Попова Н.А., Иванов Ю.Ф. и др. Структура и источники дальнодействующих полей напряжений ультрадисперсной меди // Структура, фазовые превращения и свойства нанокристаллических сплавов. Екатеринбург, 1997.
29. Могутнов Б.М., Томилин И.А., Шварцман Л.М. Термодинамика железо-углеродистых сплавов. М., 1972.
30. Громов В.Е., Козлов Э.В., Панин В.Е., Иванов Ю.Ф. и др. Каналы деформации в условиях электропластического стимулирования // Металлофизика. 1991. Т. 13. № 11.