ПРОМЕТЕЙ

MRS
St ★ Petersburg

ISSN 1994-6716

ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

3(115), 2023

КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ

80

ДЛЯ СТРАНЫ И МИРА

Санкт-Петербург

Адрес учредителя и издателя: Россия, 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

Факс: (812) 710-3756. Телефон: (812) 274-1032
E-mail: mail@crism.ru
http://www.crism-prometey.ru

Журнал издается с сентября 1995 г., выходит четыре раза в год.

Зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-13228 от 22 июля 2002 г.
Изменения внесены Роскомнадзором, ПИ № ФС 77-73502 от 31 августа 2018 г.

Журнал «Вопросы материаловедения» включен в перечень периодических изданий, рекомендуемых ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней, индексируется в базах данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ/RSCI), Ulrich's Periodicals Directory, EBSCO, входит в состав RSCI на платформе Web of Science.

Founder & Editor Address:
NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey",
49 Shpalernaya Street,
191015 St Petersburg, Russian Federation

Fax: (812) 710 3756. Phone: (812) 274 1032
E-mail: mail@crism.ru
Internet site: http://www.crism-prometey.ru

The journal comes out four times a year since September 1995

It is registered in the Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications of the Russian Federation. Registration certificate ПИ No 77-13228 dated 22 July 2002.
Changes applied by Roskomnadzor ПИ No ФС 77-73502 dated 31 August 2018.

The "Voprosy Materialovedeniya" journal is included into the list of periodicals approved by VAK RF (High Attestation Committee) for publication works of competitors for academic degrees, and into the data bases of the Russian Science Citation Index (RSCI), within the Web of Science, EBSCO, and Ulrich's Periodicals Directory.

УДК 669.14.018.294.2:620.192.4

ГРАДИЕНТЫ СТРУКТУРЫ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И ДИСЛОКАЦИОННОЙ СУБСТРУКТУРЫ В ГОЛОВКЕ РЕЛЬСОВ ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. Е. ГРОМОВ[1], д-р физ.-мат. наук, М. А. ПОРФИРЬЕВ[1], Ю. Ф. ИВАНОВ[2], д-р физ.-мат. наук, Р. Е. КРЮКОВ[1], д-р техн. наук, В. В. ШЛЯРОВ[1]

[1]*Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Россия, Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru*

[2]*Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 1.06.2023
После доработки 7.06.2023
Принята к публикации 13.06.2023

Методами просвечивающей электронной микроскопии выполнен анализ градиентов структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры на глубину до 10 мм по центральной оси головки рельсов категории ДТ400ИК специального назначения после пропущенного тоннажа 234,7 млн. т на Забайкальской железной дороге. Выявлено формирование изгибных контуров экстинкции, свидетельствующее об упругонапряженном состоянии материала. Указаны источники кривизны-кручения кристаллической решетки: внутрифазные и межфазные границы. Рассмотрены механизмы разрушения пластинчатого перлита (разрезание движущимися дислокациями) и растворения с перемещением атомов углерода на дефекты.

Ключевые слова: заэвтектоидная сталь, головка рельсов, градиенты, плотность дислокаций, фрагменты

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-39-48

Введение

Развернутая длина пути РЖД превышает 120 тыс. км, на которых уложено более 20 млн. т рельсов. Доля стоимости рельсов в общем объеме работ по капитальному ремонту составляет до 70%. Значительный рост объемов грузовых и пассажирских перевозок в последние годы вызывает необходимость создания рельсов с высокими эксплуатационными свойствами [1]. Для этих целей в России в течение более 10 лет производятся 100-метровые дифференцированно закаленные рельсы категории ДТ350 общего назначения. Однако для высокоскоростного движения в экстремальных условиях эксплуатации необходимы рельсы специального назначения – низкотемпературной надежности, повышенной износостойкости и контактной выносливости. Для формирования высокого уровня механических свойств рельсов таких категорий и совершенствования режимов их дифференцированной закалки необходимо понимание физических механизмов и закономерностей формирования структуры, фазового состава и дефектной субструктуры поверхностных слоев в головке рельсов по различным направлениям после различных объемов пропущенного тоннажа. Ранее для рельсов доэвтектоидного состава категории ДТ350 вдоль центральной оси симметрии и радиуса скругления выкружки головки рельсов был установлен градиентный характер изменения различных морфологических видов структуры (пластинчатый, разрушенный, вырожденный перлит, наноразмерный цементит, субмикрокристаллическая зеренно-субзеренная структура) [2–5].

Выявленные количественные закономерности были использованы при сертифицировании рельсов этой категории и прогнозировании гарантированной наработки 2–2,5 млрд. т пропущенного тоннажа. Одной из основных причин деградации свойств поверхности рельсов и их изъятия является контактно-усталостный износ. Негативные процессы (релаксационные, рекристаллизацион-

ные, фазовые превращения, аморфизация и т. д.), приводящие к изменению (ухудшению) механических свойств, активно изучаются в работах зарубежных исследователей [6–10], особенно в последние годы [11–16]. Поэтому выявление физической природы и закономерностей эволюции структурно-фазовых состояний, дислокационной субструктуры в головке рельсов при длительной эксплуатации представляет особую актуальность и ее исключительную практическую значимость.

Цель настоящей работы – анализ формирования градиентных структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры в головке рельсов из заэвтектоидной стали после длительной эксплуатации на Забайкальской железной дороге.

Материал и методики исследования

В качестве материла для исследования использованы образцы 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ400ИК после эксплуатации на Забайкальской железной дороге после изъятия по дефекту 44.0 – боковой износ головки рельса сверх допускаемых норм по всей длине [17]. Рельсы были изготовлены из стали 90ХАФ, элементный состав которой регламентируется ГОСТ 51685-243 и ТУ 24.10.75111-298-057576.2017 РЖД. Рельс был уложен 04.11.2020 при смене наружной рельсовой нити в кривой R = 324 м на спусковом участке пути. Боковой износ рельса составил 17 мм, пропущенный тоннаж на дату изъятия 234,7 млн. т брутто.

Исследование структурно-фазового состояния и дефектной субструктуры проводили методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (ПЭМ) тонких фольг, используя прибор JEM-2100 (JEOL, Япония) [18–20]. Объекты исследования для ПЭМ изготавливали методом электролитического утонения пластинок, расположенных у поверхности катания и на расстоянии до 10 мм от поверхности по центральной оси головки. Методика оценки скалярной плотности дислокаций изложена в [21–23].

Результаты исследования и их обсуждение

Исследуемая сталь на расстоянии от поверхности катания 2 мм и более имеет структуру перлита преимущественно пластинчатой морфологии с незначительным количеством включений первичного цементита. Исследуемая сталь не содержит зерен и прослоек феррита, свободных от выделений цементита, которые в количестве 3–7% присутствовали в рельсах с концентрацией углерода, близкой к эвтектоидной. Отсутствие включений феррита, а также наличие включений первичного цементита указывает на более высокий уровень механических и трибологических свойств рельсов категории ДТ400ИК по сравнению с рельсами других категорий [1–4]. Как и для рельсов категории ДТ350 [1–4], длительная эксплуатация приводит к существенным изменениям структуры поверхности катания головки рельсов.

Поверхностный слой поверхности катания наряду с зернами, сохранившими морфологию пластинчатого перлита, содержит зерна, в которых наблюдается зеренно-субзеренная структура, размеры кристаллитов которой изменяются в пределах от 120 до 175 нм. Формирование зеренно-субзеренной структуры в поверхностном слое поверхности катания сопровождается разрушением колоний перлита и диспергированием пластин цементита (рис. 1, *а*, *б*). Представленные на рис. 1, *в*, *г* темнопольные изображения свидетельствуют о том, что формирующиеся наноразмерные (18–25 нм) частицы цементита располагаются строчками в пределах существовавших ранее пластин цементита.

Разрушение пластин цементита осуществляется по двум механизмам. Первый из них заключается в перерезании пластин движущимися дислокациями и переносе ими атомов углерода в ферритную матрицу; оценки показывают, что в данном случае степень распада цементита составляет несколько десятых процента от ко-

личества разрушаемых пластин. Второй механизм заключается в вытягивании атомов углерода из карбидной фазы и переносе их на дислокации вследствие заметной разницы 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, формирующейся вокруг пластины цементита. При этом степень распада цементита определяется плотностью дислокаций и типом дислокационной субструктуры [1, 24].

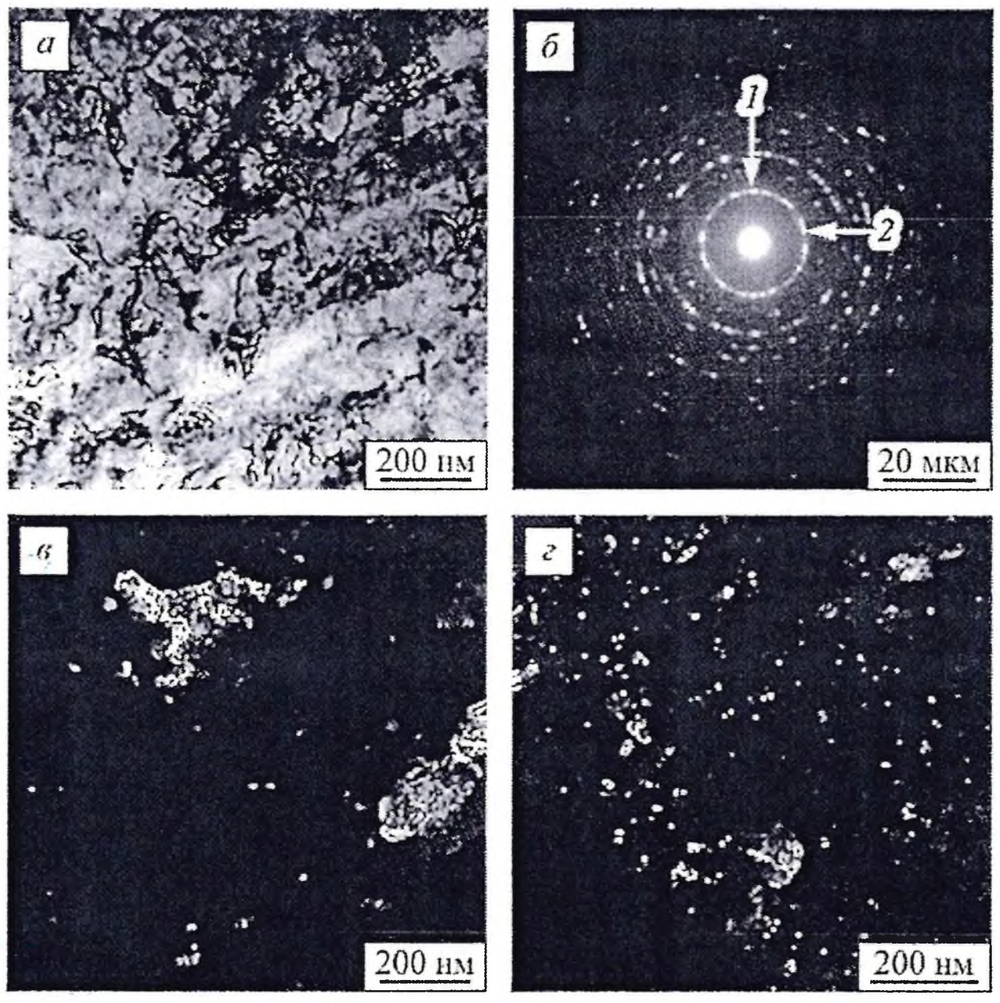

Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя:
а – светлое поле; *б* – микроэлектронограмма, указаны рефлексы, в которых получены темные поля для рис. 1, *в* (*1*) и рис. 1, *г* (*2*); *в*, *г* – темные поля, полученные в рефлексах [110]α-Fe + [031]Fe_3C; [110]α-Fe + [211]Fe_3C

При «вытягивании» атомов углерода из кристаллической решетки наблюдается изменение дефектной субструктуры карбида из-за проникновения дислокаций в решетку цементита [24–26]. Однако некогерентная межфазная граница α-Fe–Fe_3C будет этому препятствовать, оставляя возможным лишь диффузионный массоперенос. Он может быть реализован различными механизмами, обсуждаемыми в [27–30], – диффузией по междоузлиям и по деформационным вакансиям. Представления о механизме пластической дисторсии, когда за счет формирования кривизны кристаллической решетки материал способен испытывать значительное формоизменение без разрушения, могут быть полезными при анализе механизмов перемещения атомов углерода [31–33]. Ротационные моды пластической деформации, связанные с формированием локальной кривизны решетки, делают возможным (облегченным) перемещение атома углерода [34]. Так как рельсы испытывают циклические нагрузки, такой механизм может развиваться обратимо, что позволяет перестраиваться внутренней структуре без образования несплошностей.

Пластины феррита перлитных колоний слоев металла, расположенных на глубине 2 и 10 мм, содержат дислокационную субструктуру преимущественно в виде хаотически распределенных дислокаций (рис. 2). Наиболее информативной характеристикой дислокационной субструктуры является скалярная плотность [21–23]. Максимальная плотность дислокаций фиксируется в слое, формирующем поверхность металла рельсов. По мере удаления от поверхности скалярная плотность дислокаций снижается. Скалярная плотность дислокаций в слое металла,

расположенном на глубине 10 мм, $<\rho> = 3{,}3 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$; в слое, расположенном на глубине 2 мм, несколько выше – $<\rho> = 4{,}1 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$ (рис. 3, *а*).

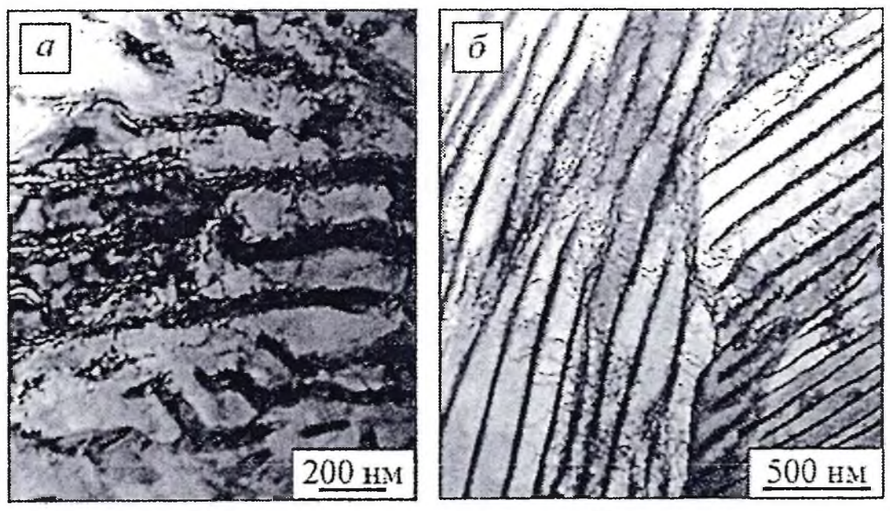

Рис. 2. Дислокационная субструктура слоя металла рельса (поверхность катания), расположенного на расстоянии 10 мм (*а*) и 2 мм (*б*) от поверхности катания

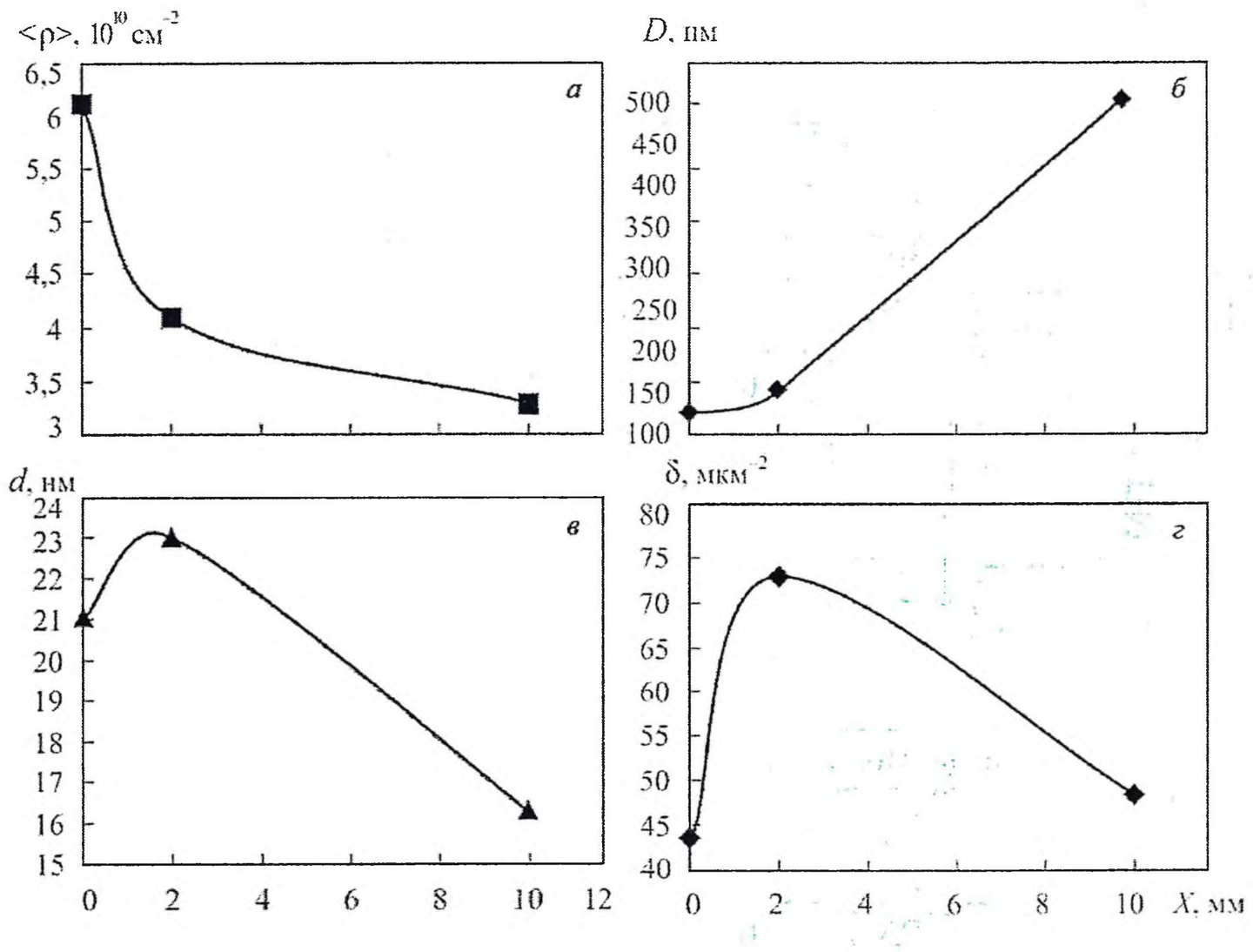

Рис. 3. Зависимости скалярной плотности (*а*), размеров фрагментов ферритных пластин (*б*) и пластин цементита (*в*), плотности концентратов напряжений (*г*) от расстояния от поверхности катания

Дислокационная субструктура поверхностного слоя металла рельсов зависит от типа формирующейся структуры. А именно в зернах пластинчатого перлита наблюдается субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций. Скалярная плотность дислокаций $<\rho> = 5{,}1 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$. В областях с субмикрокристаллической зеренно-субзеренной структурой наряду со структурой дислокационного хаоса наблюдается сетчатая дислокационная субструктура. Скалярная плотность дислокаций в этом случае $<\rho> = 7{,}2 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$. Плотность дислокаций, формирующих субграницы, достигает значения $13{,}5 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$.

Анализ структуры стали показывает, что пластины феррита перлитных колоний разделены на слабо разориентированные области (фрагменты). Об этом свидетельствуют чередующиеся темные и светлые области, присутствующие на электронно-микроскопических изображениях структуры стали. Средние размеры

фрагментов увеличиваются от 125 нм (поверхность катания рельса) до 152 нм (слой на глубине 2 мм) и 500 нм (слой на глубине 10 мм) (рис. 3, *б*).

Подобная разориентированная фрагментированная субструктура наблюдается и в пластинах цементита (рис. 4). Средние размеры фрагментов изменяются немонотонным образом, достигая максимального значения, равного 23 нм, в слое, расположенном на глубине 2 мм; при этом в слое, формирующем поверхность катания рельса, размеры фрагментов 21 нм, в слое, расположенном на глубине 10 мм, – 16,3 нм (рис. 3, *в*).

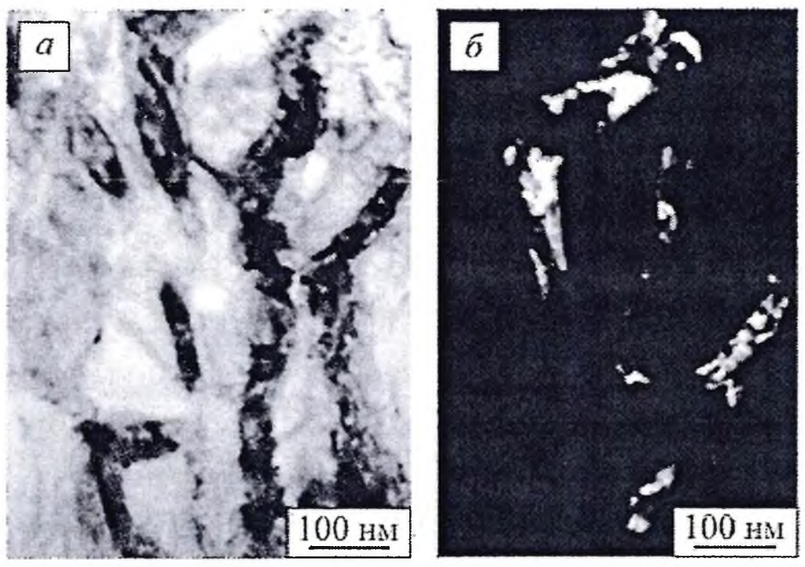

Рис. 4. Фрагментированная субструктура пластин цементита перлитных колоний.
Слой металла рельса, расположенный на глубине 10 мм:
а – светлое поле; *б* – темное поле, полученное в рефлексе [211] Fe_3C

Эволюция фрагментированной структуры при дальнейшей эксплуатации может привести к формированию локальных участков, не способных далее обеспечивать протекание релаксационных процессов, отмечаемых в рельсах из доэвтектоидной стали при пропущенном тоннаже 1770 млн. т брутто [1]. Эта так называемая критическая структура является местом последующего зарождения областей вязкого разрушения [34]. Очаги разрушения образуются по границам фрагментов, которые разделяют области, как правило, свободные от дислокаций [35]. Критическая плотность дефектов будет сдерживать развитие упругой деформации и механизма пластической дисторсии. Поэтому повышение ресурса рельсов может быть достигнуто за счет как можно более длительного сохранения структуры, ее способности к обратимым деформационным процессам без разрушения цементита с последующим перемещением атома углерода на дефекты решетки [34].

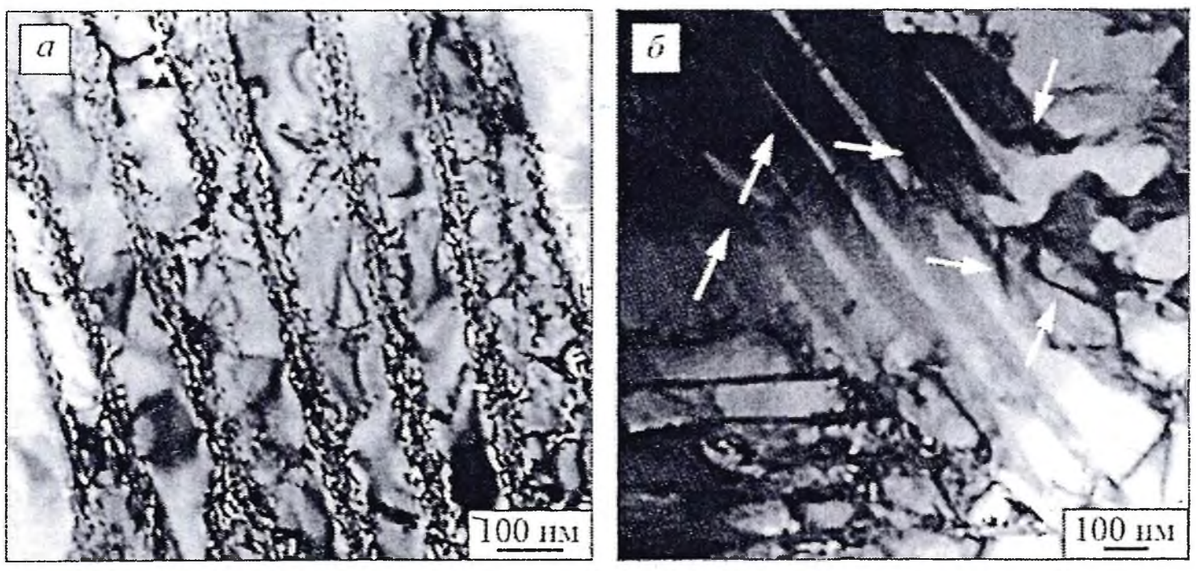

Рис. 5. Изгибные контуры экстинкции, наблюдающиеся на электронно-микроскопических изображениях пластин феррита (*а*) и цементита (*б*). Контуры указаны стрелками

На электронно-микроскопических изображениях структуры стали присутствуют изгибные контуры экстинкции, свидетельствующие об изгибе–кручении фольги под действием внутренних полей напряжений (рис. 5). Выполненные исследования показали, что изгибные контуры формируются у границ раздела зерен

и субзерен перлита (внутрифазные границы раздела) и границ раздела пластин феррита и цементита (межфазные границы раздела). Следовательно, источниками (концентраторами) полей напряжений исследуемой стали являются именно границы раздела.

Оценив плотность изгибных контуров (количество контуров на единице площади фольги), можно оценить количество концентраторов напряжений в исследуемом материале. Установлено, что плотность концентраторов напряжений δ изменяется немонотонным образом и достигает наибольшего значения в слое, расположенном на глубине 2 мм (δ = 72,7 мкм$^{-2}$). В слое, расположенном на глубине 10 мм, δ = 48,5 мкм$^{-2}$; в слое, формирующем поверхность катания, δ = 43,7 мкм$^{-2}$ (рис. 3, *г*). Для объемно-закаленных рельсов после пропущенного тоннажа 1000 млн. т на этой глубине отмечено образование слоя, характеризующегося высоким уровнем дефектности [36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исходном состоянии структура рельсов из заэвтектоидной стали категории ДТ400ИК состоит из пластинчатого перлита с незначительными включениями первичного цементита. Длительная эксплуатация на Забайкальской железной дороге сопровождается формированием градиентной структуры, заключающейся в закономерном изменении морфологии и дефектной субструктуры пластинчатого перлита в слое толщиной 0–10 мм по центральной оси головки рельсов. Установлено, что в поверхности катания наряду с зернами, сохранившими морфологию пластинчатого перлита, формируются зерна, в которых наблюдается зеренно-субзеренная структура с размерами кристаллитов 120–175 нм. Выявлено разрушение в поверхностном слое металла рельсов колоний перлита и диспергирование пластин цементита с формированием наноразмерных 18–25 нм частиц третичного цементита, располагающихся строчками в пределах существовавших ранее пластин цементита. Рассмотрены механизмы разрушения пластин цементита: разрезание движущимися дислокациями и растворение пластин с перемещением атомов углерода на дефекты. Показано, что эксплуатация рельсов сопровождается формированием градиента скалярной плотности дислокаций, размеров фрагментов пластин феррита и цементита, плотности концентраторов внутренних полей напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. 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.

3. 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.

4. 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 РАН. Физика, технические науки. – 2022. – Т. 503. – С. 8–12.

5. Lojkowski W., Millman Y., Chugunova S.I., Goncharova I.V., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Fecht H.-J. The mechanical properties of the nanocrystalline layer on the surface of railway tracks // Materials Science and Engineering A. – 2003. – V. 303, N 1–2. – P. 209–215.

6. Lojkowski W., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Gierlotka S., Zielinski W., Fecht H.-J. Nanostructure formation on the surface of railway tracks // Materials Science and Engineering A. – 2001. – V. 303. – P. 197–208.

7. Ivanisenko Yu., Fecht H. J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels: effect of high strain rate deformation // Steel Tech. – 2008. – V. 3, N 1. – P. 19–23.

8. Ishida M. Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies // Electronic Journal of Structural Engineering. – 2013. – V. 13. – P. 67–74.

9. Steenbergen M., Dollevoet R. On the mechanism of squat formation on train rails: Part I. Origination // International Journal of Fatigue. – 2013. – V. 47. – P. 361–372.

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

11. Konieczny J., Labisz K. Structure and Properties of the S49 Rail after a Long Term Outdoor Exposure // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2022. – V. 16, N 2. – P. 280–290.

12. Shi X.-J., Zhang X.-X., Diao G.-J., Yan Q.-Z. Wear Behavior of High-Speed Wheel and Rail Steels under Various Hardness Matching // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2023. – V. 32. – P. 366–380.

13. Atroshenko S. A., Smirnov V. I., Maier S. S. Failure analysis of pearlitic rail steel with internal macrocrack after long-term operation // Engineering Failure Analysis. – 2022. – V. 139. – P. 106445.

14. Man T., Zhou Y., Dong N., Liu T., Dong H. Microstructural Evolution of the Rail Steels Manufactured by Hanyang Iron Works // Materials. – 2022. – V. 15 (16). – P. 5488.

15. Su X., Zhu M., Xu G., Zhang Q., Cai F. Comparison Between the Wear Behavior of U68CuCr and U71MnG Rail Steels // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – V. 231. – P. 2896–2908.

16. Woodhead D.H. Investigating the performance of rail steels // Fields journal of Huddersfield student research. – 2021. – V. 7 (1). – P. 15.

17. Шур Е. А. Повреждения рельсов. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.

18. Zuo J. M., Spence J. C. H. Advanced Transmission Electron Microscopy. – New York: Springer, 2017. – 729 p.

19. Egerton F. R. Physical Principles of Electron Microscopy. – Basel: Springer International Publishing, 2016. – 196 p.

20. Carter C. B., Williams D. B. Transmission Electron Microscopy. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.

21. Конева Н. А., Козлов Э. В. Дислокационная структура и физические механизмы упрочнения металлических материалов // Перспективные материалы. Структура и методы исследования / Под ред. Д. Л. Меерсона. – Тула: ТГУ; М.: МИСиС, 2006. – С. 267–320.

22. Конева Н. А., Киселева С. Ф., Попова Н. А. Эволюция структуры и внутренние поля напряжений. Аустенитная сталь. – Saarbrucken: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2017. – 145 с.

23. Тришкина Л. И., Черкасова Т. В., Попова Н. А., Конева Н. А., Громов В. Е., Аксенова К.В. Дислокационный ансамбль: скалярная плотность дислокаций и ее компоненты. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2019. – 71 с.

24. Гриднев В. Н., Гаврилюк В. Г. Распад цементита при пластической деформации стали // Металлофизика. – 1982. – Т. 4, № 3. – С. 74–87.

25. Tsellermaer V. Ya. Substructural and phase transformations during intense plastic deformation of metals // Steel Trans. – 1999. – V. 29, N 12. – P. 75–81.

26. Bhadeshia H. K. D. H. Cementite // International materials reviews. – 2020. – V. 65. – P. 1–27.

27. Gavriljuk V. G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation // Materials Science and Engineering A. – 2003. – V. 345. – P. 81–89.

28. 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. – V. 59. – P. 3965–3977.

29. Gavriljuk V. G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires // Scripta Mater. – 2001. – V. 45. – P. 1469–1472.

30. Цементит в углеродистых сталях / Под ред. В. М. Счастливцева. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2017. – 380 с.

31. Panin V. E., Egorushkin V. E., Panin A. V., Chernyavskii A. G. Plastic distortion as a fundamental mechanism in nonlinear mesomechanics of plastic deformation and fracture // Phys. Mesomech. – 2016. – V. 19, N 3. – P. 255–268.

32. Панин В. Е., Егорушкин В. Е., Панин А. В. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе // УФН. – 2012. – Т. 182, № 12. – С. 1351–1357.

33. Панин В. Е., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Юрьев А. А., Кормышев В. Е. Роль кривизны решетки в деградации структуры поверхностного слоя металла рельсов при длительной эксплуатации // Доклады РАН. Физика, технические науки. – 2020. – Т. 494. – С. 68–71.

34. Панин В. Е., Иванов Ю. Ф., Юрьев А. А., Громов В. Е., Панин С. В., Кормышев В. Е., Рубанникова Ю. А. Эволюция тонкой структуры и свойств металла рельсов при длительной эксплуатации // Физическая мезомеханика. – 2020. – Т. 23, № 5. – С. 85–94.

35. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.

36. Громов В. Е., Перегудов О. А., Иванов Ю. Ф., Коновалов С. В., Юрьев А. А. Эволюция структурно-фазовых состояний металла рельсов при длительной эксплуатации. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 164 с.

GRADIENTS OF STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND DISLOCATION SUBSTRUCTURE OF THE RAIL HEADS MADE OF HYPEREUTECTOID STEEL AFTER OPERATION

V.E. GROMOV[1], Dr Sc. (Phys-Math), M.A. PORFIRIEV[1], Yu.F. IVANOV[2], Dr Sc. (Phys-Math), R.E. KRYUKOV[1], Dr Sc (Eng), V.V. SHLYAROV[1]

[1]Siberian State Industrial University (SibSIU), 42 Kirova St, 654007Novokuznetsk, Russian Federation
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

[2]Institute of High Current Electronics, Siberian branch of RAS, 2/3 Akademichesky, 634055 Tomsk, Russian Federation

Received June 1, 2023
Revised June 7, 2023
Accepted June 13, 2023

Abstract—The analysis of gradients of structure-phase states and dislocation substructure at a depth of up to 10 mm along the central axis of the head of DT400IK rails after 234.7 million tons passed on the Transbaikal railroad has been carried out using transmission electron microscopy methods. The formation of bending contours of extinction, indicating the elastically stressed state of the material, is revealed. Sources of curvature-torsion of the crystal lattice are indicated: intra- and interphase boundaries. The mechanisms of destruction of lamellar pearlite (cutting by moving dislocations) and dissolution with displacement of carbon atoms to defects are considered.

Keywords: hypereutectoid steel, rail head, gradients, dislocation density, fragments

DOI: 10.22349/1994-6716-2023-115-3-39-48

REFERENCES

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

2. Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Kuznetsov, R.V., Glezer, A.M., Shlyarova, Yu.A., Peregudov, O.A., Deformatsionnoe preobrazovanie struktury i fazovogo sostava poverkhnosti relsov pri sverkhdlitelnoi ekspluatatsii [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.

3. Kuznetsov, R.E., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Kormyshev, V.E., Shlyarova, Yu.A., Yuriev, A.A., Gradienty struktury, fazovogo sostava i dislokatsionnoi substruktury relsov pri sverkhdlitelnoi ekspluatatsii [Gradients of the structure, phase composition and dislocation substructure of rails during ultra-long operation], *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No 1, pp. 44–50.

4. Grigorovich, K.V., Gromov, V.E., Kuznetsov, R.V., Ivanov, Yu.F., Shlyarova, Yu.A., Formirovanie tonkoi struktury perlitnoi stali pri sverkhdlitelnoi plasticheskoi deformatsii [Formation of a fine structure of pearlitic steel under ultra-long plastic deformation], *Doklady Rossiiskoi akademii nauk: Fizika, tekhnicheskie nauki*, 2022, V. 503, pp. 8–12.

5. Lojkowski, W., Millman, Y., Chugunova, S.I., Goncharova, I.V., Djahanbakhsh, M., Bürkle, G., Fecht, H.-J., The mechanical properties of the nanocrystalline layer on the surface of railway tracks, *Materials Science and Engineering: A*, 2003, V. 303, No 1–2, pp. 209–215.

6. Lojkowski, W., Djahanbakhsh, M., Bürkle, G., Gierlotka, S., Zielinski, W., Fecht, H.-J., Nanostructure formation on the surface of railway tracks, *Materials Science and Engineering: A*, 2001, V. 303, pp. 197–208.

7. Ivanisenko, Yu., Fecht, H.J., Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels: effect of high strain rate deformation, *Steel Tech.*, 2008, V. 3, No.1, pp. 19–23.

8. Ishida, M., Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2013, V. 13, pp. 67–74.

9. Steenbergen, M., Dollevoet, R., On the mechanism of squat formation on train rails: Part 1: Origination, *International Journal of Fatigue*, 2013, V. 47, pp. 361–372.

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

11. Konieczny, J., Labisz, K., Structure and Properties of the S49 Rail after a Long Term Outdoor Exposure, *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2022, V. 16, No 2, pp. 280–290.

12. Shi, X.-J., Zhang, X.-X., Diao, G.-J., Yan, Q.-Z., Wear Behavior of High-Speed Wheel and Rail Steels under Various Hardness Matching, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, V. 32, pp. 366–380.

13. Atroshenko, S.A., Smirnov, V.I., Maier, S.S., Failure analysis of pearlitic rail steel with internal macrocrack after long-term operation, *Engineering Failure Analysis*, 2022, V. 139, p. 106445.

14. Man, T., Zhou, Y., Dong, N., Liu, T., Dong, H., Microstructural Evolution of the Rail Steels Manufactured by Hanyang Iron Works, *Materials*, 2022, V. 15 (16), pp. 5488.

15. Su, X., Zhu, M., Xu, G., Zhang, Q., Cai, F., Comparison Between the Wear Behavior of U68CuCr and U71MnG Rail Steels, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, V. 231, pp. 2896–2908.

16. Woodhead, D.H., Investigating the performance of rail steels, *Fields journal of Huddersfield student research*, 2021, V. 7 (1), pp. 15.

17. Shur, E. A., *Povrezhdeniya relsov* [Rail damage], Moscow: Intekst, 2012.

18. Zuo, J.M., Spence, J.C.H., Advanced Transmission Electron Microscopy, New York: Springer, 2017.

19. Egerton, F R., *Physical Principles of Electron Microscopy*, Basel: Springer International Publishing, 2016.

20. Carter, C.B., Williams, D.B., *Transmission Electron Microscopy*, Berlin: Springer International Publishing, 2016.

21. Koneva, N.A., Kozlov, E.V., *Dislokatsionnaya struktura i fizicheskie mekhanizmy uprochneniya metallicheskikh materialov* [Dislocation structure and physical mechanisms of hardening of metal materials], Perspektivnye materialy. Struktura i metody issledovaniya, Meerson, D.L. (Ed.), Tula: TGU, Moscow: MISiS, 2006, pp. 267–320.

22. Koneva, N.A., Kiseleva, S.F., Popova, N.A., *Evolyutsiya struktury i vnutrennie polya napryazhenii. Austenitnaya stal* [Evolution of the structure and internal stress fields. Austenitic steel], Saarbrucken: Lambert Academic Publishing, 2017.

23. Trishkina, L.I., Cherkasova, T.V., Popova, N.A., Koneva, N.A., Gromov, V.E., Aksenova, K.V., *Dislokatsionny ansambl: skalyarnaya plotnost dislokatsii i ee komponenty* [Dislocation ensemble: scalar dislocation density and its components], Novokuznetsk: SibSIU, 2019.

24. Gridnev, V.N., Gavrilyuk, V.G., Raspad tsementita pri plasticheskoi deformatsii stali [Decay of cementite during plastic deformation of steel], *Metallofizika*, 1982, V. 4, No 3, pp. 74–87.

25. Tsellermaer, V.Ya., Substructural and phase transformations during intense plastic deformation of metals, *Steel Trans.*, 1999, V. 29, No 12, pp. 75–81.

26. Bhadeshia, H.K.D.H., Cementite, *International materials reviews*, 2020, V. 65, pp. 1–27.

27. Gavriljuk, V.G., Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation, *Mater. Sci. Eng. A*, 2003, V. 345, pp. 81–89.

28. 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, V. 59, pp. 3965–3977.

29. Gavriliuk, V.G., Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires, *Scripta Mater.*, 2001, V. 45, pp. 1469–1472.

30. Schastlivtseva, V.M. (Ed.), *Tsementit v uglerodistykh stalyakh* [Cementite in carbon steels], Ekaterinburg: UMC UPI, 2017.

31. Panin, V.E., Egorushkin, V.E., Panin, A.V., Chernyavsky, A.G., Plastic distortion as a fundamental mechanism in nonlinear mesomechanics of plastic deformation and fracture, *Phys. Mesomech.*, 2016, V. 19, No 3, pp. 255–268.

32. Panin, V.E., Egorushkin, V.E., Panin, A.V., Nelineinye volnovye protsessy v deformiruemom tverdom tele kak mnogourovnevoi ierarkhicheski organizovannoi sisteme [Nonlinear wave processes in a deformable solid as a multilevel hierarchically organized system], *UFN*, 2012, V. 182, No 12, pp. 1351–1357.

33. Panin, V.E., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Yuriev, A.A., Kormyshev, V.E., Rol krivizny reshetki v degradatsii struktury poverkhnostnogo sloya metalla relsov pri dlitelnoi ekspluatatsii [The role of the lattice curvature in the degradation of the structure of the surface layer of metal rails during long-term operation], *Doklady RAN. Fizika, tekhnicheskie nauki*, 2020, V. 494, pp. 68–71.

34. Panin, V.E., Ivanov, Yu.F., Yuriev, A.A., Gromov, V.E., Panin, S.V., Kormyshev, V.E., Rubannikova, Yu.A., Evolyuciya tonkoi struktury i svoistv metalla relsov pri dlitelnoi ekspluatatsii [Evolution of the fine structure and properties of metal rails during long-term operation], *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2020, V. 23, No 5, pp. 85–94.

35. Rybin, V.V., *Bolshie plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov* [Large plastic deformations and destruction of metals], Moscow: Metallurgiya, 1986.

36. Gromov, V.E., Peregudov, O.A., Ivanov, Yu.F., Konovalov, S.V., Yuriev, A.A., *Evolyutsiya strukturno-fazovykh sostoyanii metalla relsov pri dlitelnoi ekspluatatsii* [Evolution of structural-phase states of metal rails during long-term operation], Novosibirsk: SO RAN, 2017.