

УДК 669.539.382:669.17:625.1

## СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ В ГОЛОВКЕ РЕЛЬСОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

@2023 г. Ю.Ф. Иванов<sup>1\*</sup>, М.А. Порфирьев<sup>2\*</sup>, В.Е. Громов<sup>2\*</sup>,  
Р.Е. Крюков<sup>2\*</sup>, Ю.А. Шлярова<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

<sup>2\*</sup>Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Поступила в редакцию 28 июня 2023 г.

После доработки 26 июля 2023 г. принята к публикации 14 августа 2023 г.

Методами просвечивающей электронной микроскопии выполнен анализ изменения структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры в головке длинномерных дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ400ИК специального назначения из стали Э90ХАФ вдоль радиуса скругления выкружки на поверхности и на расстоянии 2 и 10 мм от нее после пропущенного тоннажа 187 млн. т брутто в процессе полигонных испытаний. Отмечено формирование изгибных контуров экстинкции, свидетельствующих об упругонапряженном состоянии головки рельсов в результате длительной эксплуатации. Выявлены источники кривизны кручения кристаллической решетки. Рассмотрены механизмы разрушения пластин цементита и повторного выделения частиц наноразмерной карбидной фазы.

*Ключевые слова:* тонкая структура; поверхность; рельсы; скалярная плотность дислокаций; цементит; разрушение.

Железнодорожные рельсы, представляющие стратегический продукт страны с разветвленной сетью дорог, традиционно являются актуальным объектом прикладных и фундаментальных исследований [1, 2]. В связи с наметившейся в последние годы тенденцией возрастания скоростей и интенсивности железнодорожного транспорта в разряд актуальных задач выходит создание рельсов с высокими эксплуатационными характеристиками. Срок службы и эксплуатационная стойкость объемно и дифференцированно закаленных рельсов во многом определяется структурно-фазовым состоянием стали, механическими свойствами, условиями эксплуатации и др. В рельсах при современных скоростях движения железнодорожных составов и высоких контактных давлениях уже при сравнительно небольшом пропущенном тоннаже в поверхностных слоях наблюдается сильное изменение структуры металла, отмечаются аномально высокие значения микротвердости и распад цементита [3—12]. В последние годы внимание исследователей в области физического материаловедения

привлечено к анализу различных аспектов рельсовой стали при деформации [13—20]. Анализ поведения рельсов при длительной эксплуатации и причин деградации структуры и свойств, приводящей к последующему их изъятию, представляет значительный научный и практический интерес. Процессы формирования и эволюции структурно-фазовых состояний и свойств поверхностных слоев рельсов при длительной эксплуатации обуславливают сложный комплекс взаимосвязанных научных и технических вопросов. Важность информации в этой области определяется глубиной понимания фундаментальных проблем физики конденсированного состояния, с одной стороны, и практической значимостью проблемы, с другой.

На металлургическом предприятии АО «Евраз ЗСМК» (Новокузнецк)<sup>1</sup> три года назад начато производство 100-м рельсов специального назначения повышенной износо-

<sup>1</sup>Предприятие АО «Евраз Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», Кемеровская область—Кузбасс.

стойкости и контактной выносливости категории ДТ400ИК. Сформированная микроструктура таких рельсов должна в условиях сверхдлительной эксплуатации обеспечивать сохранение заданных эксплуатационных свойств и исключать возможность протекания процессов разрушения с катастрофическими последствиями. Для формирования высоких эксплуатационных свойств таких рельсов при совершенствовании режимов дифференцированной закалки необходимо понимание природы и закономерностей образования структурно-фазовых состояний в поверхностных слоях головки рельсов по разным направлениям после разных объемов пропущенного тоннажа.

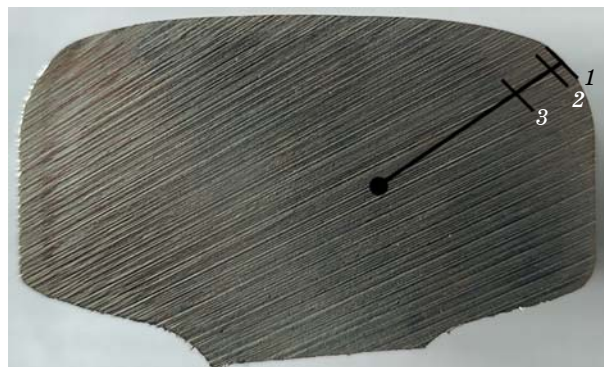
Ранее было установлено, что изменение относительного содержания разных типов структуры, скалярной и избыточной плотности дислокаций, объемной доли карбидной фазы и атомов углерода вдоль разных направлений в головке рельсов общего назначения категории ДТ350 из доэвтектоидной стали носит градиентный характер [21—23]. Для рельсов категории ДТ350 процессы преобразования структурно-фазовых состояний и дефектной структуры при длительной эксплуатации на поверхности выкружки рельсов развиваются в большей степени относительно поверхности катания [1].

Настоящая работа проведена с целью анализа формирования структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры в поверхностных слоях выкружки рельсов из заэвтектоидной стали после эксплуатации.

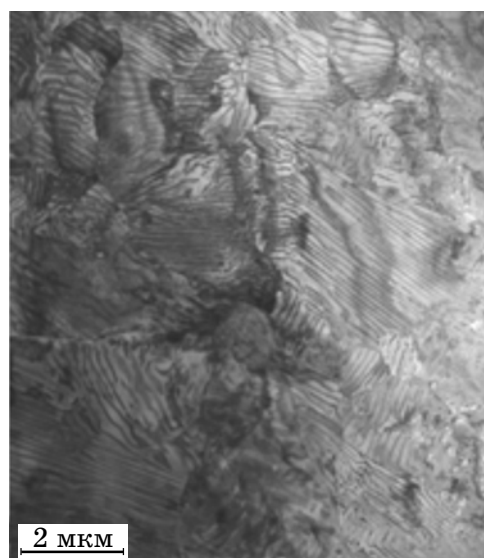
#### Материал и методика исследования.

Объектом исследования были образцы дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ400ИК из стали Э90ХАФ производства АО «Евраз ЗСМК» после пропущенного тоннажа 187 млн. т брутто в процессе полигонных испытаний на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» (Щербинка)<sup>2</sup>. Элементный состав регламентирован ГОСТ 51685—2013 и ТУ 24.10.75111-298-057576.2017РЖД. Морфологию структуры и фазового состава, дислокационную субструктуру определяли методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, прибор JEOL JEM2100F) [24—26]. Выполнены исследования металла

<sup>2</sup>Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта».



Фиг. 1. Образец рельса после пропущенного тоннажа 187 млн. т и схема, объясняющая приготовление объектов исследования 1—3 (соответственно образцы поверхностного металла и слоев на расстоянии 2 и 10 мм от поверхности по радиусу скругления выкружки)

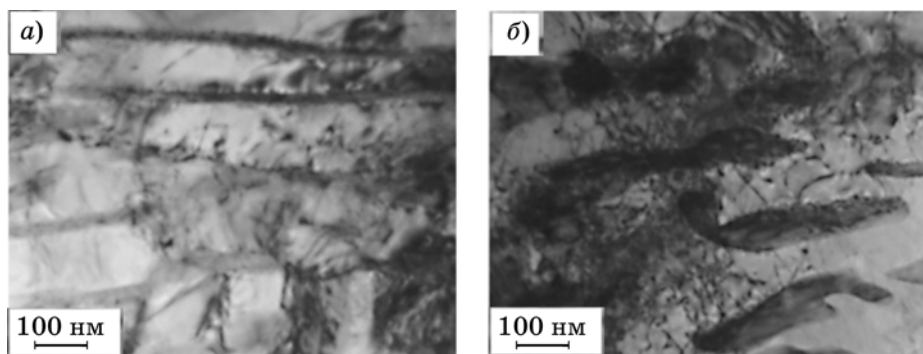


Фиг. 2. Перлитная структура рельсовой стали заэвтектоидного состава. Изображение получено методом STEM анализа

в головке рельсов вдоль радиуса скругления выкружки на поверхности и на расстояниях 2 и 10 мм от нее (фиг. 1). Методика оценки скалярной плотности дислокаций изложена в работах [1, 27].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Структура стали представлена зернами перлита преимущественно пластинчатой морфологии (фиг. 2) размером 0,6—3 мкм. В пластинах феррита перлитных колоний наблюдается дислокационная субструктура<sup>3</sup>. Основными типами дислокационной субструктуры являются структура, сформированная хаотически распределенными дисло-

<sup>3</sup>Метод STEM анализа — научный совокупный подход (science, technology, engineering, mathematics).



Фиг. 3. Электронно-микроскопическое изображение хаотически распределенных дислокаций (а) и сетчатой дислокационной субструктуры (б)

кациями (фиг. 3, а) и сетчатая дислокационная субструктура (фиг. 3, б).

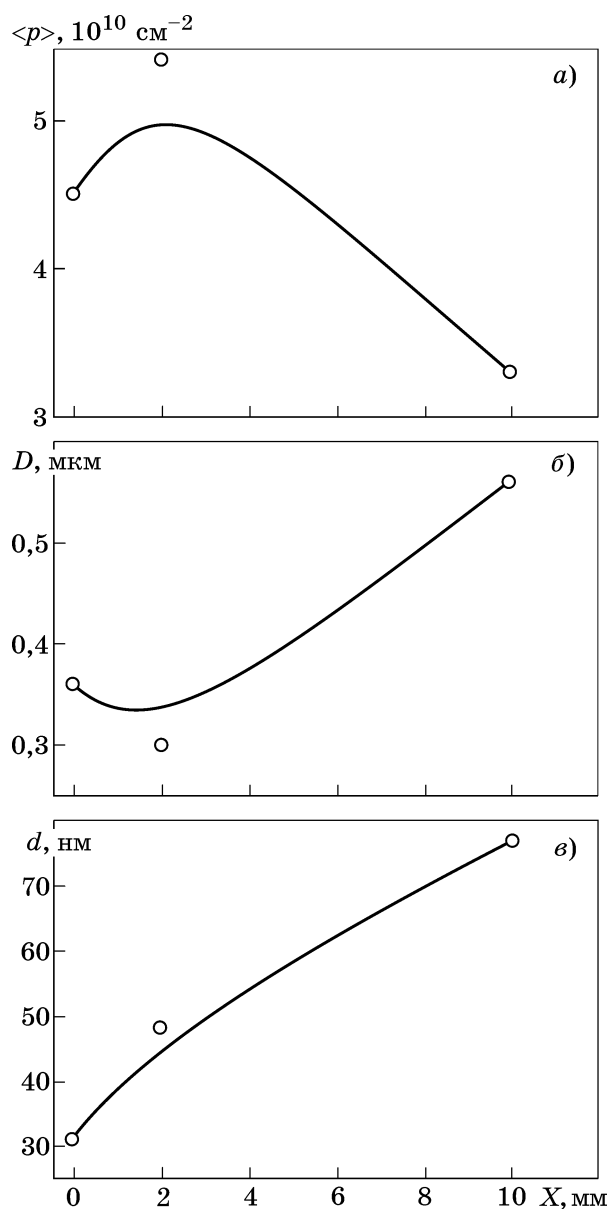
Выполненные исследования показывают, что скалярная плотность дислокаций исследуемой стали увеличивается по мере приближения к поверхности выкружки рельсов, достигая максимального значения на расстоянии 2 мм от поверхности (фиг. 4, а).

Ферритные пластины перлитной структуры фрагментированы. Поперечные размеры фрагментов ограничены расстоянием между пластинами цементита и практически не зависят от расстояния до поверхности выкружки. Продольные средние размеры фрагментов увеличиваются по мере удаления от поверхности выкружки и изменяются соответственно кривой на фиг. 4, б.

В пластинах цементита также наблюдается фрагментированная структура, которая наиболее отчетливо выявляется на темнопольных изображениях. Анализ структуры пластин цементита показывает, что продольные размеры фрагментов увеличиваются по мере удаления от поверхности выкружки (фиг. 4, в).

Выявлено присутствие на электронно-микроскопических изображениях структуры тонких фольг изгибных контуров экстинкции, что свидетельствует о кривизне кручении кристаллической решетки анализируемого материала [1, 21—23]. В исследуемой стали изгибные контуры экстинкции наблюдаются как в ферритных пластинах, так и в пластинах цементита. Контуров первого типа, наблюдаемые в ферритных пластинах, могут распространяться на все зерно перлита, начинаясь и заканчиваясь на его границах.

Источником кривизны кручения материала в этом случае являются границы раздела зерен или колоний перлита. Контуров вто-



Фиг. 4. Зависимости скалярной плотности дислокаций (а), продольных размеров фрагментов ферритных пластин (б), продольных размеров фрагментов пластин цементита (в) от расстояния X до поверхности выкружки

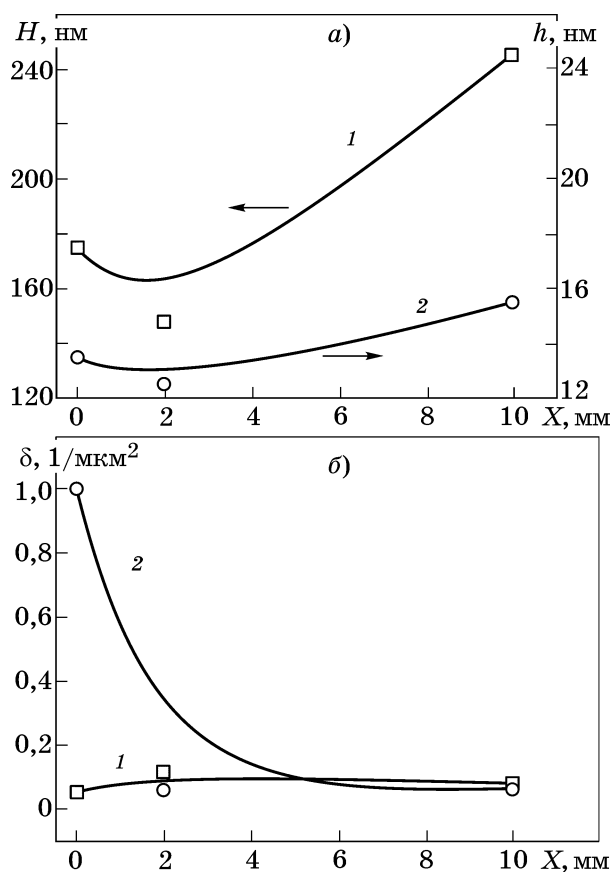
рого типа располагаются в пределах отдельно взятой пластины феррита. В этом случае источником кривизны кручения кристаллической решетки материала являются границы раздела пластин феррита и цементита.

В качестве характеристик степени изгиба кручения кристаллической решетки металла рельс использовали среднюю толщину (поперечные размеры) контура и число контуров на единице площади фольги. Анализируя результаты исследований, приведенные на фиг. 5, а, можно отметить, что средние поперечные размеры экстинкционных контуров обоих типов изменяются немонотонным образом по мере удаления от поверхности выкружки и достигают минимальных значений на глубине 2 мм. Учитывая хорошо известные факты, указывающие на обратно пропорциональную зависимость поперечных размеров контуров и величины внутренних напряжений в материале [1, 21—23], можно констатировать, что наиболее напряженным является подповерхностный слой металла рельсов. При этом амплитуда напряжений, формирующихся у межфазной границы (границы раздела пластин цементита и феррита), на порядок выше амплитуды напряжений, формирующихся у внутрифазных границ (границы зерен перлита). Ранее для объемно-закаленных рельсов после пропущенного тоннажа 1000 млн. т в слое на расстоянии 2 мм от поверхности также отмечался высокий уровень дефектности

Представленные на фиг. 5, б результаты, демонстрирующие градиент удельной плотности контуров (число контуров экстинкции на единице площади фольги), свидетельствуют о ярко выраженной зависимости от расстояния плотности контуров второго типа, достигающей максимальной величины на поверхности выкружки. Этот факт указывает на высокую плотность концентраторов напряжения именно у межфазных границ раздела.

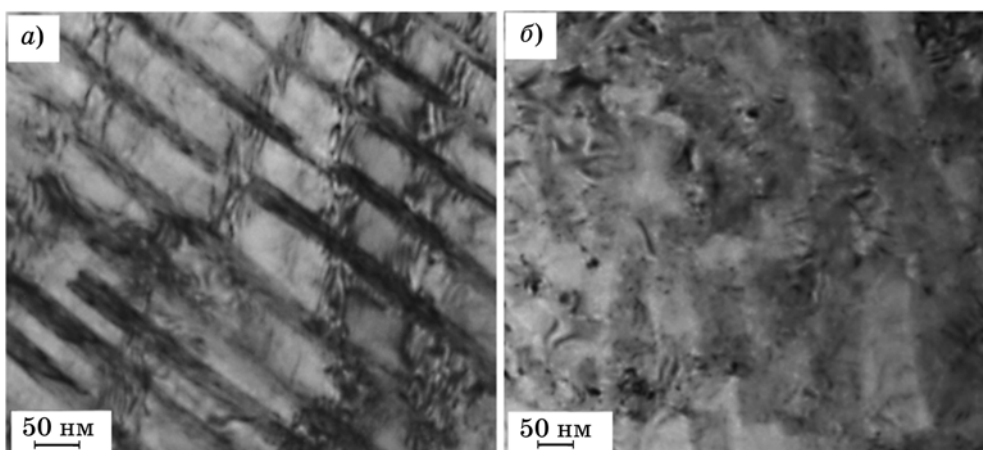
Значительно реже контуры экстинкции наблюдаются в пластинах цементита. Поперечные размеры таких контуров практически не зависят от расстояния от поверхности выкружки и изменяются в пределах 8—13 нм.

В ряде работ, обзор которых представлен в монографии [1], показано, что деформационное воздействие на структуру перлита пластинчатой морфологии при больших степенях деформирования сопровождается преоб-



Фиг. 5. Зависимости поперечных размеров изгибных контуров экстинкции (а) и их удельной плотности (б) от расстояния  $X$  до поверхности выкружки: 1, 2 — контуры соответственно первого и второго типа

разованием пластин цементита, протекающим преимущественно по двум основным механизмам [1]. Во-первых, по механизму растворения с выходом атомов углерода в ядра дислокаций с последующим выносом их в объем ферритных пластин и образованием там наноразмерных частиц карбидной фазы глобулярной формы (возможность реализации данного механизма обусловлена тем, что энергия связи атомов углерода с дислокациями выше энергии связи атомов углерода в частицах цементита). Во-вторых, по механизму разрезания пластин цементита движущимися дислокациями с последующим перемещением осколков в объеме деформируемого зерна перлита. В предельном случае измельчение пластин цементита приводит к их растворению. Согласно классическим представлениям диффузия углерода протекает в поле напряжений, создаваемом дислокационной субструктурой, которая формируется вокруг пластин цементита. При этом степень распада цементита, как прави-



Фиг. 6. Электронно-микроскопические изображения структуры рельсов: *а* — в слое на глубине 2 мм от поверхности выкружки (можно видеть частицы цементита в объеме пластин феррита); *б* — поверхностный слой

ло, определяется величиной плотности дислокаций и типом субструктуры [28, 29].

Выполненные в настоящей работе исследования выявили оба механизма разрушения цементита. В слое, расположенном на глубине 2 мм от поверхности выкружки, основным механизмом разрушения пластин цементита является механизм растворения с последующим выделением в объеме пластин феррита наноразмерных частиц карбида железа (фиг. 6, *а*). В поверхностном слое выкружки реализуются оба механизма преобразования пластин цементита — растворение и разрушение путем перерезания движущимися дислокациями (фиг. 6, *б*).

**Выводы.** 1. Методами просвечивающей электронной микроскопии показано, что после длительной эксплуатации структура рельсов представлена зернами перлита преимущественно пластинчатой морфологии. В пластинах феррита перлитных колоний наблюдается дислокационная субструктура, скалярная плотность дислокаций которой увеличивается по мере приближения к поверхности выкружки рельса, достигая максимального значения на расстоянии 2 мм от поверхности. Пластины феррита и цементита перлитной структуры фрагментированы, продольные размеры фрагментов уменьшаются по мере приближения к поверхности выкружки.

2. Выявлено присутствие на электронно-микроскопических изображениях структуры изгибных контуров экстинкции, свидетельствующее об упругонапряженном состоянии головки рельсов. Концентраторами напряжений являются границы раздела зерен пер-

лита (внутрифазные границы) и границы раздела пластин феррита и цементита (межфазные границы). Амплитуда напряжений, формирующихся у межфазной границы, на порядок выше амплитуды напряжений, формирующихся у внутрифазных границ.

3. Установлено, что максимальное количество концентраторов напряжений, формирующихся у межфазных границ раздела, максимально на поверхности выкружки рельсов. Выявлены два механизма преобразования пластин цементита: растворение пластин с уходом атомов углерода на движущиеся дислокации и разрезание пластин цементита движущимися дислокациями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yuriev, A.A. Structure and properties of lengthy rails after extreme long-term operation / A.A. Yuriev, Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov, Yu.A. Rubannikova, M.D. Starostenkov, P.Y. Tabakov. — Millersville (USA) : Materials Research Forum LLC, 2021. 190 p.
2. Gromov, V.E. Microstructure of quenched rails / V.E. Gromov, A.B. Yuriev, K.V. Morozov, Y.F. Ivanov. — [S.l.] : Cambridge, ISP Ltd, 2016. 153 p.
3. Ivanisenko, Yu. Shear-induced  $\alpha \rightarrow \gamma$  transformation in nanoscale Fe-C composite / Yu. Ivanisenko, I. MacLaren, X. Sauvage, R.Z. Valiev, H.-J. Fecht // Acta Materialia. 2006. V.54. P.1659—1669. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.11.034>.
4. Lojkowski, W. The mechanical properties of the nanocrystalline layer on the surface of railway tracks / W. Lojkowski, Y. Millman, S.I. Chugunova, I.V. Goncharova, M. Djahanbakhsh, G. Bürkle, H.-J. Fecht // Mater. Sci. Eng.: A. 2001. V.303. №1—2. P.209—215. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01948-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01948-1).
5. Lojkowski, W. Nanostructure formation on the surface of railway tracks / W. Lojkowski, M. Djahanbakhsh, G. Bürkle, S. Gierlotka, W. Zielinski, H.-J. Fecht // Mater. Sci. Eng.: A. 2001. V.303. P.197—208. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01947-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01947-X).

6. *Ivanisenko, Yu.* Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels: effect of high strain rate deformation / Yu. Ivanisenko, H.J. Fecht // *Steel Tech.* 2008. V.3. №1. P.19—23.
7. *Takahashi, J.* Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a rail track surface / J. Takahashi, K. Kawakami, M. Ueda // *Acta Materialia*. 2010. V.58. P.3602—3612. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.030>.
8. *Benoit, D.* The tridimensional gradient of microstructure in worn rails — Experimental characterization of plastic deformation accumulated by RCF / D. Benoit, B. Salima, R. Marion // *Wear*. 2017. V.392, 393. P.50—59.
9. *Benoit, D.* Multiscale characterization of head check initiation on rails under rolling contact fatigue : Mechanical and microstructure analysis / D. Benoit, B. Salima, R. Marion // *Wear*. 2016. V.366, 367. P.383—391.
10. *Chen, H.* Understanding cementite dissolution in pearlitic steels subjected to rolling-sliding contact loading : A combined experimental and theoretical study / Chen H., Ji Y., Zhang C., Liu W., Yang Z., Chen L.-Q., Chen L. // *Acta Materialia*. 2017. V.141. P.193—205.
11. *Ma, L.* Fatigue crack growth and damage characteristics of high-speed rail at low ambient temperature / Ma L., Guo J., Liu Q.-Y., Wang W.-J. // *Eng. Failure Analysis*. 2017. V.82. P.802—815.
12. *Masoumi, M.* Role of microstructure and crystallographic orientation in fatigue crack failure analysis of a heavy haul railway rail / M. Masoumi, A. Sinatorra, H. Goldenstein // *Eng. Failure Analysis*. 2019. V.96. P.320—329.
13. *Turan, M.E.* Residual stress measurement by strain gauge and X-ray diffraction method in different shaped rails / M.E. Turan, F. Aydin, Y. Sun, M. Cetin // *Eng. Failure Analysis*. 2019. V.96. P.525—529.
14. *Shi, X.-J.* Wear behavior of high-speed wheel and rail steels under various hardness matching / Shi X.-J., Zhang X.-X., Diao G.-J., Yan Q.-Z. // *J. Mater. Eng. Performance*. 2022.
15. *Cookson, J.M.* The role of the environment in the rolling contact fatigue cracking of rails / J.M. Cookson, P.J. Mutton // *Wear*. 2011. V.271. P.113—119.
16. *Rui, P.* Investigation into the microstructure evolution and damage on rail at curved tracks / P. Rui, C. Yuda, L. Hu, E. Shiju, R. Ruiming // *Wear*. 2022. V.504, 505. Art.204420.
17. *Yoshikazu, K.* Influence of a decarburised layer on the formation of microcracks in railway rails : On-site investigation and twin-disc study / K. Yoshikazu, U. Naotaka, L. Hu, M. Motohide, N. Shoji // *Wear*. 2022. V.504, 505. Art.204427.
18. *Miranda, R.S.* Fatigue and wear behavior of pearlitic and bainitic microstructures with the same chemical composition and hardness using twin-disc tests / R.S. Miranda, A.B. Rezende, S.T. Fonseca, F.M. Fernandes, A. Sinatorra, P.R. Mei // *Wear*. 2022. V.494, 495. Art.204253.
19. *Michaël, S.* On the genesis of squat-type defects on rails — toward a unified explanation / S. Michaël // *Wear*. 2021. V.478, 479. Art.203906.
20. *Liang, Z.* Comparison of the damage and microstructure evolution of eutectoid and hypereutectoid rail steels under a rolling-sliding contact / Liang Z., Wei B., Zhenyu H., Wenjian W., Yue H., Haohao D., Roger L., Enrico M., Qiyue L., Jun G. // *Wear*. 2022. V.492, 493. Art.204233.
21. *Громов, В.Е.* Деформационное преобразование структуры и фазового состава поверхности рельсов при сверхдлительной эксплуатации / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Р.В. Кузнецов, А.М. Глезер, Ю.А. Шлярова, О.А. Перегудов // *Деформация и разрушение материалов*. 2022. №1. С.35—39. DOI : 10.31044/1814-4632-2022-1-35-39.
22. *Кузнецов, Р.Е.* Градиенты структуры, фазового состава и дислокационной субструктуры рельсов при сверхдлительной эксплуатации / Р.Е. Кузнецов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Кормышев, Ю.А. Шлярова, А.А. Юрьев // *Изв. Алтайского гос. ун-та*. 2022. №1. С.44—50. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2022\)1-06](https://doi.org/10.14258/izvasu(2022)1-06)
23. *Григорович, К.В.* Формирование тонкой структуры перлитной стали при сверхдлительной пластической деформации / К.В. Григорович, В.Е. Громов, Р.В. Кузнецов, Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Шлярова // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. 2022. Т.503. С.8—12. DOI : 10.31857/S2686740022020079.
24. *Egerton, F.R.* Physical principles of electron microscopy / F.R. Egerton. — Basel : Springer International Publishing, 2016. 196 p.
25. *Kumar, C.S.S.R.* Transmission electron microscopy. Characterization of nanomaterials / C.S.S.R. Kumar. — N.Y. : Springer, 2014. 717 p.
26. *Carter, C.B.* Transmission electron microscopy / C.B. Carter, D.B. Williams. — Berlin : Springer International Publishing, 2016. 518 p.
27. *Конева, Н.А.* Дислокационная структура и физические механизмы упрочнения металлических материалов / Н.А. Конева, Э.В. Козлов // *Перспективные материалы. Структура и методы исследования (учеб. пособ.)* / под ред. Д.Л. Мерсона. — Тула : ТГУ; М. : МИСиС, 2006. С.267—320.
28. *Gavriljuk, V.G.* Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation / V.G. Gavriljuk // *Mater. Sci. Eng. A*. 2003. V.345. P.81—89. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00358-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00358-1)
29. *Цементит в углеродистых сталях* / под ред. В.М. Счастливцева. — Екатеринбург : Изд-во УМЦ ЦПИ, 2017. 380 с.