

## РАЗДЕЛ 1. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 669.539.382:669.17:625.1

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.001

### ЭВОЛЮЦИЯ СУБСТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТИТА РЕЛЬСОВ ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Виктор Евгеньевич Громов<sup>1†</sup>, Юрий Федорович Иванов<sup>2</sup>, Михаил Анатольевич Порфирьев<sup>3</sup>,  
Юлия Андреевна Шлярова<sup>4</sup>

<sup>1, 3, 4</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

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

<sup>1</sup> gromov@physics.sibsiu.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

<sup>2</sup> yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

<sup>3</sup> mporf372@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5739>

<sup>4</sup> rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

**Аннотация.** Методами, просвечивающие электронный микроскопии выполнен анализ субструктуры цемента в головке длинномерных рельсов специального назначения категории ДТ400ИК из заэвтектоидной стали после длительной эксплуатации на экспериментально на кольце РЖД (пропущенный тоннаж 187 млн. тонн). Показано, что после эксплуатации пластины цементита искривляются и разделяются ферритными мостиками. В пластинах феррита и цементита формируется дислокационная субструктура: хаотически распределенного и сеченого типа в феррите и упорядоченная в цементе. Отмечена повышенная плотность дислокаций на межфазных границах феррит-цементит по сравнению с объемом ферритных пластин. Указаны два возможных механизма деформационного преобразования зерен пластинчатого перлита: разрушение пластин цементита и вытягивание углерода из решетки карбидной фазы. Указано, что вынос углерода из цементитных пластин происходит наиболее интенсивно вблизи дефектов феррите и цементите. Образованные наноразмерные частицы третичного цементита распределены в ферритных пластинах неравномерно, большая их часть наблюдается в местах расположения ферритных субзерен и межфазных границ. Это приводит к неоднородному дифракционному контрасту на темнопольных изображениях цементных пластин. Выявлена фрагментация пластин феррита и цементита и оценены азимутальные составляющие углов полной разориентации. По всем установленным закономерностям преобразования субструктуры цементита осуществлено сравнение с результатами для рельсов из доэвтектоидной стали.

**Ключевые слова:** цементит, заэвтектоидная сталь, электронная микроскопия, дислокационная субструктура, феррит, фрагментация.

**Благодарности:** Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение» ФГБОУ ВО «СибГИУ».

**Для цитирования:** Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Порфирьев М.А., Шлярова Ю.А. Эволюция субструктуры цементита рельсов из заэвтектоидной стали при эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 3. С. 273–282. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.001.

Original article

**EVOLUTION OF THE SUBSTRUCTURE OF CEMENTITE OF RAILS FROM HYPEREUTECTOID STEEL DURING OPERATION****Victor E. Gromov<sup>1†</sup>, Yurii F. Ivanov<sup>2</sup>, Mikhail A. Porfiriev<sup>3</sup>, Yulia A. Shliarova<sup>4</sup>**<sup>1,3,4</sup> Siberian State Industrial University, Kirov Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia<sup>2</sup> Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademicheskiy Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia<sup>1</sup> gromov@physics.sibsiu.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343><sup>2</sup> yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958><sup>3</sup> mporf372@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5739><sup>4</sup> rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

**Abstract.** Transmission electron microscopy methods were used to analyze the cement substructure in the head of special-purpose long rails of the DH400RK category made of hypereutectoid steel after long-term operation on an experimental track on the Russian Railways ring (passed tonnage 187 million tons). It is shown that after operation, the cementite plates are bent and separated by ferrite bridges. In the plates of ferrite and cementite, a dislocation substructure is formed: a chaotically distributed and cross-sectional type in ferrite and ordered in cement. An increased density of dislocations at ferrite-cementite interfaces compared to the volume of ferrite plates was noted. Two possible mechanisms of deformation transformation of lamellar perlite grains are indicated: destruction of cementite plates and carbon pulling out from the lattice of the carbide phase. It is indicated that the removal of carbon from cementite plates occurs most intensively near defects in ferrite and cementite. The formed nanosized particles of tertiary cementite are unevenly distributed in ferrite plates, most of them are observed at the locations of ferrite subgrains and interfacial boundaries. This results in non-uniform diffraction contrast in dark-field images of cement slabs. Fragmentation of ferrite and cementite plates is revealed and azimuthal components of total misorientation angles are estimated. According to all the established laws of transformation of the cementite substructure, a comparison was made with the results for rails made of hypoeutectoid steel.

**Keywords:** cementite, hypereutectoid steel, electron microscopy, dislocation substructure, ferrite, fragmentation.

**Acknowledgements:** The study was carried out using the equipment of the Center for Collective Use «Materials Science» of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «SibSIU».

**For citation:** Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Porfiriev, M. A. & Shliarova, Yu. A. (2024). Evolution of the substructure of cementite of rails from hypereutectoid steel during. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(3), 273–282. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.001.

**Введение**

В последние годы внимание исследователей в области физического материаловедения сконцентрировано на традиционном направлении исследования рельсовых сталей. Это обусловлено созданием рельсов специального назначения в связи с ростом интенсивного использования железнодорожного транспорта и увеличения скорости движения.

В России с 2013 г. для решения этой проблемы начато производство 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов общего назначения из доэвтектонидной стали категории ДТ350, а с 2018 г. – рельсов специального назначения повышенной износостойкости и контактной выносливости из заэвтектонидной стали категории ДТ400ИК.

Цементит (или  $\Theta$  – карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ ) является упрочняющей фазой углеродистых сталей [1, 2]. Как правило, цементит повышает из-

носостойкость стали, действуя как препятствие для движения дислокаций. В рельсовых сталях, подвергающихся циклическим нагрузкам качения-скольжения, микроструктура изначально ответственна за деформационное упрочнение и повышение износостойкости материала. В процессе эксплуатации рельсов уже при сравнительно небольшом пропущенном тоннаже наблюдается его трансформация [3, 4]. Прочностные и пластические свойства кристаллитов цементита определяются состоянием его дефектной субструктуры. Поэтому знания об эволюции структуры цементита при эксплуатации необходимы для прогнозирования поведения рельсовой стали в условиях качения-скольжения, и надежной работы железных дорог.

В работах отечественных [5, 6] и зарубежных исследователей последних лет [7-12] проанализирована эволюция структурно-фазовых состояний, механических свойств, дефектной субструктуры в головке рельсов при различных

условиях эксплуатации и в модельных экспериментах выявлены механизмы разрушения цементита. Это позволило проанализировать механизмы износа, деградации свойств рельсов и причины выхода их из строя. Сформированный банк данных, а также результаты последних исследований [13-18] закономерностей формирования структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры можно рассматривать как достижения в физике доэвтектоидных перлитных сталей. Для рельсов из заэвтектоидной стали, к которым относятся рельсы категории ДТ400ИК, такие сведения в литературе практически отсутствуют [19]. Они представляют несомненный интерес для формирования высоких эксплуатационных свойств таких рельсов и совершенствования режимов дифференцированной закалки.

Целью настоящей работы является анализ субструктуры цементита заэвтектоидной стали, сформированной при дифференцированной закалке рельсов и их последующей длительной эксплуатации.

#### Материал и методики исследования

Материалом исследования являются образцы дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ400ИК из стали марки Э90ХАФ производства АО «Евраз-ЗСМК» после пропущенного тоннажа 187 млн. тонн брутто в процессе полигонных испытаний на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» (г. Щербинка). Элементный состав регламентирован ГОСТ 51685-2013 и ТУ 24.10.75111-298-057576.2017 РЖД. Морфологию структуры и фазового состава, дислокационную субструктуру определяли методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, прибор JEOL JEM2100F) [20-22]. Были выполнены исследования в го-

ловке рельсов вдоль центральной оси на расстоянии 10 мм от поверхности.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что исследуемая сталь имеет структуру пластинчатого перлита, характерное изображение которого приведено на рис.1. Отчетливо видно, что пластинчатый перлит является конгломератом чередующихся пластин феррита и цементита. Довольно часто пластины цементита в перлите искривлены (рис.1) и разделены ферритными мостиками (рис.2).

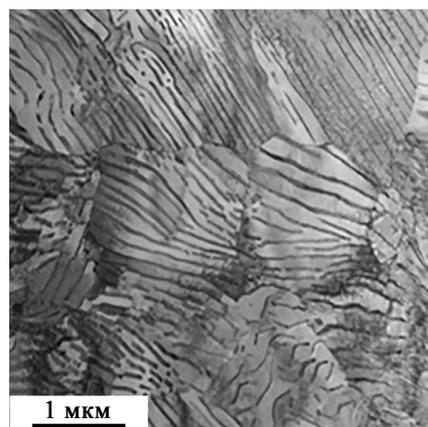


Рис.1. STEM изображение структуры рельсовой стали заэвтектоидного состава

Fig.1. STEM image of the structure of rail steel of eutectoid composition

В связи с этим считается, что в перлите феррит является сплошной, а цементит прерывистой фазой, состоящей из отдельных пластин [23, 24]. Контраст вдоль цементитной пластины неоднороден, что свидетельствует о разориентации одной части пластины относительно другой.

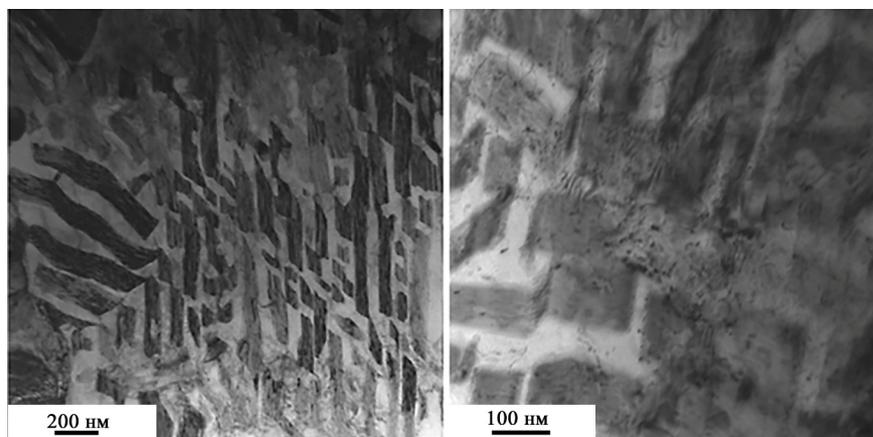
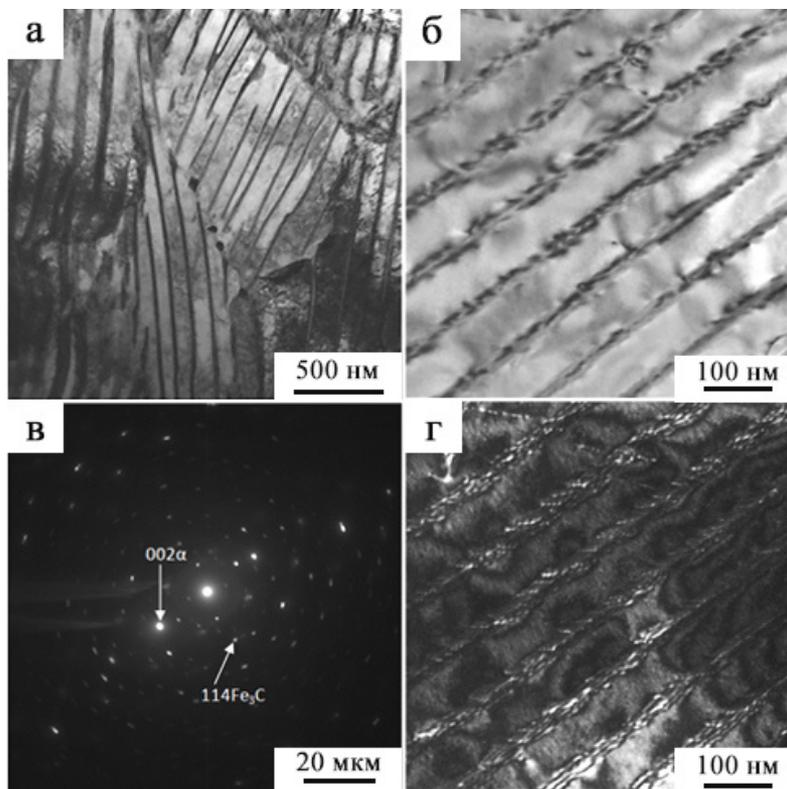


Рис.2. ПЭМ изображение пластин цементита с ферритными мостиками

Fig.2. TEM image of cementite plates with ferrite bridges

Методами светлопольного, темнопольного и микродифракционного анализа проведено исследование дефектной субструктуры пластин цементита. Установлено, что длительная эксплуатация рельсов приводит к пластической

деформации стали, сопровождающейся образованием дислокационной субструктуры как в пластинах феррита (рис.3а), так и в пластинах цементита (рис.3б,г).



**Рис.3.** ПЭМ изображение дислокационной субструктуры колонии пластинчатого перлита: а, б – светлые поля; в – микроэлектроннограмма к (б); г – темное поле, полученное в рефлексе  $114\text{Fe}_3\text{C}$

**Fig.3.** TEM image of the dislocation substructure of a lamellar pearlite colony: a, b – light fields; (c) – microelectron diffraction pattern (b); (d) – dark field obtained in the  $114\text{Fe}_3\text{C}$  reflection

В пластинах феррита дислокации распределены хаотически, либо формируют дислокационную субструктуру сетчатого типа. В пластинах цементита дислокации располагаются более упорядоченным образом, формируя параллельные ряды, ориентированные как поперек (рис.3б,г), так и вдоль пластин цементита. Можно предположить, что дислокационная субструктура в пластинах цементита формируется вдоль межфазной границы раздела, тем самым минимизируя упругие напряжения, возникающие в материале вследствие различия механических и теплофизических характеристик феррита и цементита.

На межфазной границе феррит-цементит плотность дислокаций выше, чем в ферритных пластинах. Анализ ПЭМ изображений показывает, что дислокации по характеру их распределения условно можно разделить на 2 систе-

мы. Как и в [23] отмечается, что дислокации 1-й системы вытянуты в пределах ферритной прослойки по направлению от одной межфазной границы к другой, а для 2-й системы дислокационная плоскость скольжения перпендикулярна плоскости межфазной границы. Следы плоскости скольжения этих дислокаций могут проходить через цементитную пластину и проникать в соседнюю ферритную.

Как и для рельсов из доэвтектоидной стали [3-6] длительная эксплуатация сопровождается деформационным преобразованием зерен пластинчатого перлита, а именно разрушением пластины цементита. Одним из основных механизмов разрушения цементита является его перерезание скользящими дислокациями. Этот механизм для углеродистых сталей подробно изучен в работах украинской школы металлофизиков [25-28]. В перлитных колоннах рас-

пределение деформаций неоднородно: там, где локальная деформация невелика, сохраняется пластинчатый характер структуры.

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 величиной плотности дислокаций и типом дислокационной субструктуры.

На начальной стадии преобразования цементитные пластины окутываются скользящими дислокациями, что сопровождается разбиением пластин на отдельные слабоориентированные фрагменты. Затем вследствие вытягивания атомов углерода из решетки цементита может происходить изменение структуры карбида. Это обусловлено проникновением скользящих дислокаций из кристаллической решетки феррита в кристаллическую решетку цементита. На следующем этапе растворения цементита весь объем, ранее занимаемый цементитной пластиной, заполняется наноразмерными частицами.

Явление диссоциации цементита при пластической деформации высокоуглеродистых сталей наблюдалось в работе [29]. Вынос углерода из цементитных пластин наиболее интенсивно происходит вблизи дефектов в феррите и цементите. Для феррита – это дислокационные субграницы. Можно предполагать, что концентрация углерода в феррите по сравнению с равновесной увеличивается незначительно (как и в доэвтектоидных сталях [3, 4]); основная доля углерода находится не в твердом растворе, а в виде мелких карбидных выделений и на дефектах решетки.

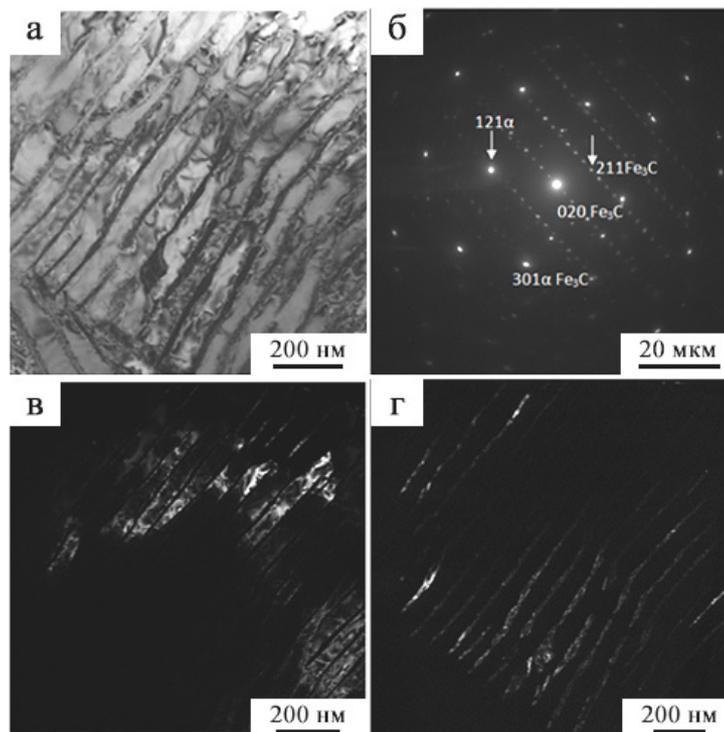
В различных ферритных пластинах наличие в субграницах дислокаций разных (противоположных) знаков может являться причиной наблюдающихся на ПЭМ изображениях чередования дифракционного контраста (контуров экстинкций) при переходе от одной ферритной пластины в другую. Аналогичные места формирования контуров экстинкции и причин их возникновения для доэвтектоидных сталей проанализированы в [3, 4]. Наличие на ПЭМ изо-

бражениях изгибных контуров экстинкции указывает на изгиб-кручения кристаллической решетки фольги (формирование внутренних полей напряжений).

Пластины феррита (рис.4) и цементита (рис.5) перлитных колоний фрагментированы, т.е. разделены на области с малоугловой разориентацией. Анализ микроэлектроннограмм позволяет по размытию рефлексов оценить азимутальную составляющую угла полной разориентации фрагментов пластин цементита и феррита. Установлено, что фрагменты цементита разориентированы на углы (3,0-3,5) град. Разориентация фрагментов пластин феррита (2,5-3) град. Можно предположить, что фрагментация пластин феррита и пластин цементита является еще одним механизмом релаксации упругих напряжений, имеющих место при дифференцированной закалке и последующей длительной эксплуатации. Для доэвтектоидных рельсов парижского метро при сопоставимых величинах пропущенного тоннажа формирование фрагментированной структуры наблюдалось на глубине ~ 4 мм от поверхности катания [30, 31]. Формирующийся при этом трехмерный градиент микроструктуры может явиться причиной зарождения микротрещин.

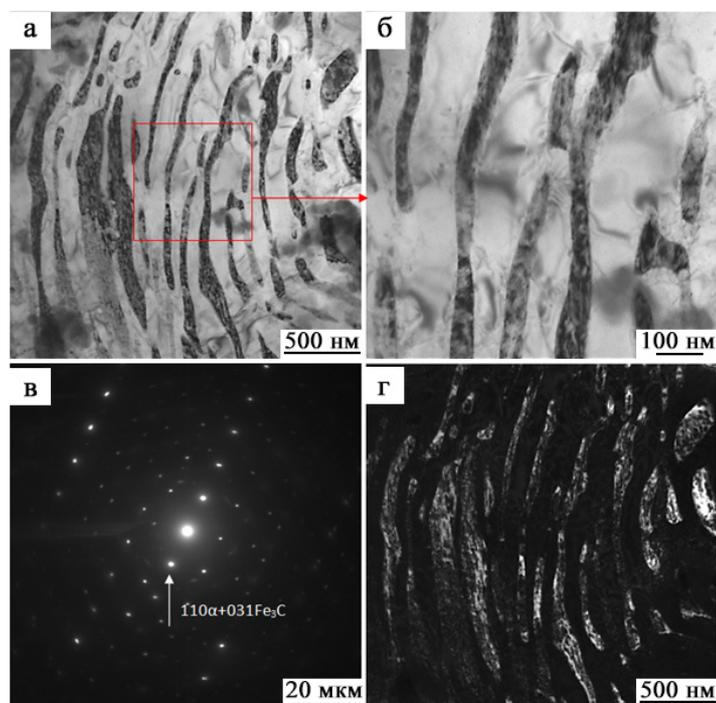
Как уже отмечалось термомеханическая обработка заэвтектоидной стали и последующая длительная эксплуатация приводят к выделению наноразмерных (5-10 нм) частиц цементита в объеме пластин феррита перлитной колонии (рис.6). Можно предположить, что это третичный цементит, образовавшийся в результате распада пересыщенного твердого раствора на основе феррита в процессе охлаждения стали от температуры перлитного превращения и последующей длительной эксплуатации.

В [23] предположено, что облегчение оттока углерода по дефектам может приводить к образованию таких ферритных прослоек в цементите вблизи таких дефектных плоскостей. Новые межфазные поверхности в свою очередь могут являться местами выделения наноразмерных карбидов. Наноразмерные частицы цементита распределены в ферритных пластинах неравномерно, их плотность больше в местах расположения ферритных субзерен, вблизи межфазных границ и других дефектов. На темнопольных изображениях дифракционный контраст неоднороден по толщине цементитных пластин из-за декорирования межфазных границ карбидами.



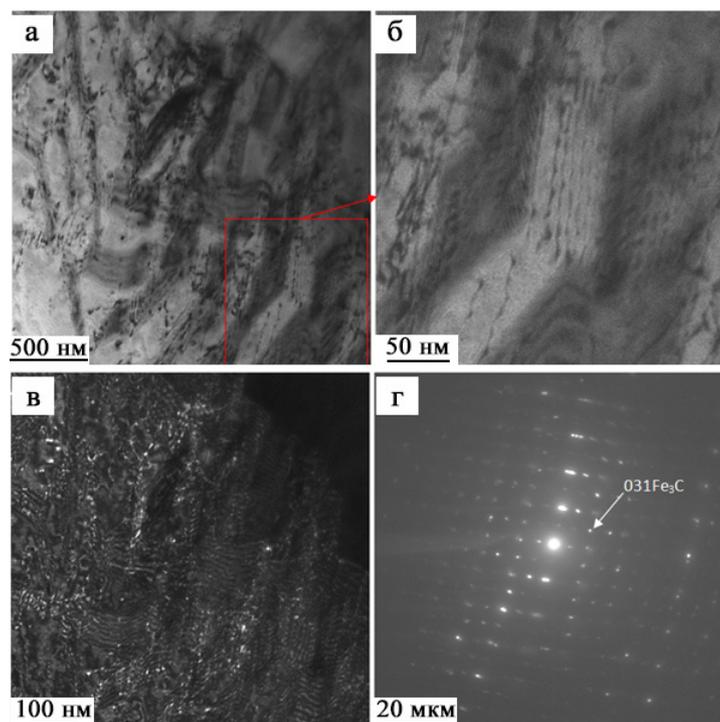
**Рис.4.** ПЭМ изображение фрагментированной структуры колоний пластинчатого перлита: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в – темное поле, полученное в рефлексе  $121\alpha\text{Fe}$ ; г – темное поле, полученное в рефлексе  $211\text{Fe}_3\text{C}$

**Fig.4.** TEM image of the fragmented structure of lamellar perlite colonies: а – bright field; б – microelectron diffraction pattern; (c) dark field obtained in the  $121\alpha\text{Fe}$  reflection; (d) dark field obtained in the  $211\text{Fe}_3\text{C}$  reflection



**Рис.5.** ПЭМ изображение фрагментированной структуры пластин цементита: а, б – светлые поля; в – микроэлектроннограмма; г – темное поле, полученное в рефлексе  $211\text{Fe}_3\text{C} + 110\alpha\text{Fe}$

**Fig.5.** TEM image of fragmented structure of cementite plates: а, б – light fields; в – microelectron diffraction pattern; (d) dark field obtained in the  $211\text{Fe}_3\text{C} + 110\alpha\text{Fe}$  reflection



**Рис.6.** ПЭМ изображение наноразмерных частиц цемента, расположенных в пластинах феррита: а, б – светлые поля; в – темное поле, полученное в рефлексе  $031\text{Fe}_3\text{C}$ ; г – микроэлектроннограмма

**Fig.6.** TEM image of nanosized cementite particles located in ferrite plates: a, b – light fields; (c) dark field obtained in the  $031\text{Fe}_3\text{C}$  reflection; d – microelectron diffraction pattern

### Заклучение

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выполнен анализ структуры и фазового состава металла рельсовой стали заэвтектоидного состава. Показано, что исследуемая сталь имеет структуру пластинчатого перлита. Установлено, что пластины феррита и цемента фрагментированы, т.е. разделены на области с малоугловой разориентацией. В объеме пластин феррита и пластин цемента присутствует дислокационная субструктура. Дислокационная субструктура пластин феррита представлена хаотически распределенными дислокациями, либо дислокационными сетками. В пластинах цемента дислокации расположены параллельными рядами. Высказано предположение, что выявленная дефектная субструктура является следствием релаксации напряжений, формирующихся в стали при термомеханической обработке и эксплуатации. Установлено, что охлаждение стали от температуры перлитного превращения и последующая длительная эксплуатация сопровождаются распадом твердого раствора на основе феррита с последующим формированием наноразмерных частиц третичного цемента. Про-

ведено сравнение с экспериментальными данными для рельсов из доэвтектоидных сталей и обсуждены механизмы преобразования субструктуры цемента.

### Список литературы

1. Bhadeshia H.K.D.H. Cementite // International Materials Reviews. 2020. V. 65, N 1. P. 1–27.
2. Цементит в углеродистых сталях / под редакцией В. М. Счастливецова. Изд-во УМЦ УПИ, 2017. 379 с.
3. 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.
4. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yuriev A.B., Morozov K.V. Microstructure of quenched rails. Cambridge. CISP Ltd, 2016. 153 p.
5. 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 // Дефор-

- мация и разрушение материалов. 2022. № 1. С. 35–39.
6. Григорович К.В., Громов В.Е., Кузнецов Р.В., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. Формирование тонкой структуры перлитной стали при сверхдлительной пластической деформации // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 503. С. 8–12.
7. 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.
8. 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(1). P. 19–23.
9. Takahashi J., Kawakami K., Ueda M. Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a railtrack surface // *Acta Materialia*. 2010. V. 58. P. 3602–3612.
10. Newcomb S.B., Stobbs W.M. A transmission electron microscopy study of the white-etching layer on a railhead // *Materials Science and Engineering*. 1984. V. 66. P. 195–204.
11. 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.
12. 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.
13. 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(2). P. 280–290.
14. 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.
15. 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.
16. Su X., Zhu M., Xu G., Zhang Q., Cai F., Liu M. Comparison Between the Wear Behavior of U68CuCr and U71MnG Rail Steels // *J. of Mater Eng and Perform*. 2022. V. 31. P. 2896–2908.
17. Tung P.-Y., Zhou X., Mayweg D., Morsdorf L., Herbig M. Under-stoichiometric cementite in decomposing binary Fe–C pearlite exposed to rolling contact fatigue // *Acta Materialia*. 2021. V. 216. P. 117144.
18. Hu Y., Watson M., Maiorino M., Zhou L., Wang W.J., Ding H.H., Lewis R., Meli E., Rindi A., Liu Q.Y., Guo J. Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values // *Wear*. 2021. V. 477. P. 203831.
19. Zhou L., Bai W., Han Z., Wang W., Hu Y., Ding H., Lewis R., Meli E., Liu Q., Guo J. Comparison of the damage and microstructure evolution of eutectoid and hypereutectoid rail steels under a rolling-sliding contact // *Wear*. 2022. V. 492–493. P. 204233.
20. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016. 196 p.
21. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 2014. 717 p.
22. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016. 518 p.
23. Яковлева И.Л., Карькина Л.Е. Электронно-микроскопический анализ дефектов в структурных составляющих крупно пластинчатого перлита после холодной пластической деформации / в кн. Цементит в углеродистых сталях / под редакцией В. М. Счастливецова. Изд-во УМЦ УПИ, 2017. С. 285–300.
24. Тушинский Л.И., Батаев А.А., Тихомирова Л.Б. Структура перлита и конструктивная прочность стали. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. 280 с.
25. Гриднев В. Н., Гаврилюк В. Г. Распад цементита при пластической деформации стали // *Металлофизика*. 1982. Т. 4. № 3. С. 74–87.
26. Gavrilyuk V.G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation // *Mater. Sci. Eng. A*. 2003. V. 345. P. 81–89.
27. 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.
28. Gavrilyuk V.G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires // *Scripta Mater*. 2001. V. 45. P. 1469–1472.
29. Mikhailov S.B., Tabatchikova T.I., Schastlivtsev V.M., Grachev S.V., Popova I.S. Behavior of pearlite upon deformation of patented U8 steel // *Fizika Metallov i Metallovedenie*. 2001. V. 91, N 6. P. 86–94.

30. Dylewski B., Risbet M., Bouvier S. The tridimensional gradient of microstructure in worn rails – Experimental characterization of plastic deformation accumulated by RCF // *Wear*. 2017. V. 392–393. P. 50–59.

31. Dylewski B., Risbet M., Bouvier S. Experimental Characterization of the Tridimensional Gradient of Microstructure Induced by RCF in the Rolling Band of Rails // *Procedia Engineering*. 2015. V. 133. P. 202–210.

### Информация об авторах

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

М. А. Порфирьев – научный сотрудник управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

Ю. А. Шлярова – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений (ЭМуОИ) Сибирского государственного индустриального университета.

### References

1. Bhadeshiam, H. K. D. H. (2020). Cementite. *International Materials Reviews*, 65(1), 1–27.

2. Cementite in carbon steels (2017). (Ed. by V. M. Schastlivtsev). Publishing House UMTs UPI. P. 379. (In Russ.).

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

4. Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Yuriev, A. B. & Morozov, K. V. (2016). Microstructure of quenched rails. Cambridge. CISP Ltd. P. 153.

5. Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Kuznetsov, R. V., Glezer, A. M., Shlyarova, Yu. A. & Peregodov, O. A. (2022). Deformation transformation of structure and phase composition of rail surface

during ultra-long operation. *Deformation and fraction of materials*, 1, 35–39. (In Russ.).

6. Grigorovich, K. V., Gromov, V. E., Kuznetsov, R. V., Ivanov, Yu. F. & Shliarova, Yu. A. (2022). Formation of the fine structure of pearlitic steel during superlong plastic deformation. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, technical sciences*, 503, 8–12. (In Russ.).

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

8. Ivanisenko, Yu. & Fecht, H. J. (2008). Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels: effect of high strain rate deformation. *Steel Tech.*, 3(1), 19–23.

9. Takahashi, J., Kawakami, K. & Ueda, M. (2010). Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a railtrack surface. *Acta Materialia*, 58, 3602–3612.

10. Newcomb, S. B. & Stobbs, W. M. (1984). A transmission electron microscopy study of the white-etching layer on a railhead. *Materials Science and Engineering*, 66, 195–204.

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

12. Steenbergen, M. & Dollevoet, R. (2013). On the mechanism of squat formation on train rails: Part I. Origination. *International Journal of Fatigue*, 47, 361–372.

13. Konieczny, J. & Labisz, K. (2022). Structure and Properties of the S49 Rail after a Long Term Outdoor Exposure. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(2), 280–290.

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

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

16. Su, X., Zhu, M., Xu, G., Zhang, Q., Cai, F. & Liu, M. (2022). Comparison Between the Wear Behavior of U68CuCr and U71MnG Rail Steels. *J. of Materi Eng and Perform.*, 31, 2896–2908.

17. Tung, P.-Y., Zhou, X., Mayweg, D., Morsdorf, L. & Herbig, M. (2021). Understoichiometric cementite in decomposing binary

Fe–C pearlite exposed to rolling contact fatigue. *Acta Materialia*, 216, 117144.

18. Hu, Y., Watson, M., Maiorino, M., Zhou, L., Wang, W. J., Ding, H. H., Lewis, R., Meli, E., Rindi, A., Liu, Q. Y. & Guo, J. (2021). Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values. *Wear*, 477, 203831.

19. Zhou, L., Bai, W., Han, Z., Wang, W., Hu, Y., Ding, H., Lewis, R., Meli, E., Liu, Q. & Guo, J. (2022). Comparison of the damage and microstructure evolution of eutectoid and hypereutectoid rail steels under a rolling-sliding contact. *Wear*, 492–493, 204233.

20. Egerton, F. R. (2016). *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing. P. 196.

21. Kumar, C. S. S. R. (2014). *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer. P. 717.

22. Carter, C. B. & Williams, D. B. (2016). *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing. P. 518.

23. Yakovleva, I. L. & Karkina, L. E. (2017). Electron microscopic analysis of defects in the structural components of coarse lamellar pearlite after cold plastic deformation / in the book. *Cementite in carbon steels* / edited by V. M. Schastlivtsev. Publishing House UMTs UPI, 285–300. (In Russ.).

24. Tushinsky, L. I., Bataev, A. A. & Tikhomirova, L. B. (1993). *Pearlite structure and structural strength of steel*. Novosibirsk: VO «Nauka». Siberian publishing company. P. 280. (In Russ.).

25. Gridnev, V. N. & Gavriljuk, V. G. (1982). Decomposition of cementite during plastic deformation of steel. *Metallofiz.*, 4(3), 74–87. (In Russ.).

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

27. Li, Y. J., Chai, P., Bochers, C., Westerkamp, S., Goto, S., Raabe, D. & Kirchheim, R.

(2011). Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite. *Acta Mater.*, 59, 3965–3977.

28. Gavriljuk, V. G. (2001). Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires. *Scripta Mater.*, 45, 1469–1472.

29. Mikhailov, S. B., Tabatchikova, T. I., Schastlivtsev, V. M., Grachev, S. V. & Popova, I. S. (2001). Behavior of pearlite upon deformation of patented U8 steel. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, 91(6), 86–94.

30. Dylewski, B., Risbet, M. & Bouvier, S. (2017). The tridimensional gradient of microstructure in worn rails – Experimental characterization of plastic deformation accumulated by RCF. *Wear*, 392–393, 50–59.

31. Dylewski, B., Risbet, M. & Bouvier, S. (2015). Experimental Characterization of the Tridimensional Gradient of Microstructure Induced by RCF in the Rolling Band of Rails. *Procedia Engineering*, 133, 202–210.

#### Information about the authors

V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

Yu. F. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of High Current Electronics SB RAS.

M. A. Porfiriev – Researcher, Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University.

Yu. A. Shliarova – Post-Graduate Student of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing (EM&OP), Siberian State Industrial University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 08.07.2024; одобрена после рецензирования 16.08.2024; принята к публикации 26.08.2024.

The article was received by the editorial board on 08 July 24; approved after reviewing 16 Aug. 24; accepted for publication 26 Aug. 24.