

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.1811-1416.2026.03.001

СТАДИИ РАЗРУШЕНИЯ ЦЕМЕНТИТА В РЕЛЬСАХ ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Виктор Евгеньевич Громов¹, Олег Владимирович Шугаев², Юрий Федорович Иванов^{3†}, Игорь Юрьевич Литовченко⁴, Алексей Борисович Юрьев⁵, Юлия Андреевна Шлярова⁶

^{1, 2, 5, 6}Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

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

⁴Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН, пр-т Академический, 2/4, Россия, 634055, Томск, Россия

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

²o_shugaev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0813-3224>

³yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

⁴litovchenko@spti.tsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5892-3719>

⁵yurev_ab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9932-4755>

⁶rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

Аннотация. Методами современного физического материаловедения (оптической, сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии, рентгенофазового анализа) выполнен анализ механизмов и стадий разрушения пластинчатого перлита на расстояниях 10, 2 и 0 мм от поверхности по радиусу скругления выкружки головки рельсов из заэвтектоидной стали после длительной эксплуатации на Восточно-Сибирской железной дороге (пропущенный тоннаж 175,9 млн. тонн брутто). Выявлены особенности двух возможных механизмов разрушения пластин цементита: деформационного (разрезание скользящими дислокациями) и недиффузионного (перемещение атомов углерода из решётки цементита на дислокации). Проведено сравнение особенностей механизмов разрушения цементита в рельсах из стали доэвтектоидного состава. Показано, что на заключительной стадии эволюции структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры, предшествующей разрушению, в объёме зёрен перлита образуется субзеренная структура на основе твёрдого раствора α -фазы с наноразмерными частицами карбидной фазы, распределённой по границам субзёрен, то есть формируется цементит глобулярной формы. Указаны возможные направления продления срока службы рельсов на основе анализа механизмов контактно-усталостного разрушения в экстремальных условиях эксплуатации на Восточно-Сибирской железной дороге.

Ключевые слова: рельсы, заэвтектоидная сталь, эксплуатация, цементит, механизмы разрушения, электронная микроскопия.

Благодарности: Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00087-2401. Выражаем благодарность Е.В. Полевому и Р.Н. Молоканову за предоставленные образцы и стимулирующие дискуссии.

Для цитирования: Громов В.Е., Шугаев О.В., Иванов Ю.Ф., Литовченко И.Ю., Юрьев А.Б., Шлярова Ю.А. Стадии разрушения цементита в рельсах из заэвтектоидной стали при длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 3. С. 282-294. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.001.

Original article

STAGES OF CEMENTITE DESTRUCTION IN HYPEREUTECTOID STEEL RAILS DURING LONG-TERM OPERATION

Victor E. Gromov¹, Oleg V. Shugaev², Yurii F. Ivanov^{3†}, Igor Y. Litovchenko⁴, Alexey B. Yuryev⁵,
Yulia A. Shliarova⁶

^{1, 2, 5, 6}Siberian State Industrial University, 654006, Novokuznetsk, Russia

³Institute of High Current Electronics SB RAS, 634055, Tomsk, Russia

⁴Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 634055, Tomsk, Russia

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

²o_shugaev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0813-3224>

³yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

⁴litovchenko@spti.tsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5892-3719>

⁵yurev_ab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9932-4755>

⁶rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

Abstract. Using modern physical materials science methods (optical, scanning and transmission diffraction electron microscopy, and X-ray diffraction analysis), an analysis of the mechanisms and stages of failure of lamellar pearlite at distances of 10, 2, and 0 mm from the surface along the fillet radius of the rail head made of hypereutectoid steel after long-term operation on the East Siberian Railway (carried tonnage of 175.9 million gross tons) was performed. The characteristics of two possible failure mechanisms of cementite laminae were identified: deformation-induced (cutting by sliding dislocations) and non-diffusion-induced (transition of carbon atoms from the cementite lattice to dislocations). A comparison of the features of the failure mechanisms of cementite in rails made of hypoeutectoid steel was conducted. It is shown that during the final stage of structural-phase state and defective substructure evolution preceding failure, a subgranular structure based on a solid solution of the α -phase with nanosized particles of the carbide phase distributed along the subgrain boundaries forms within the pearlite grains, thereby forming globular cementite. Potential avenues for extending rail service life are outlined based on an analysis of contact fatigue failure mechanisms under extreme operating conditions on the East Siberian Railway.

Keywords: rails, hypereutectoid steel, operation, cementite, destruction mechanisms, electron microscopy.

Acknowledgements: This study was conducted within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-00087-2401. We express our gratitude to E.V. Polevoy and R.N. Molokanov for providing samples and stimulating discussions.

For citation: Gromov V. E., Shugaev O. V., Ivanov Yu. F., Litovchenko I. Yu., Yuryev A. B. & Shliarova, Yu. A. (2026). Stages of cementite destruction in hypereutectoid steel rails during long-term operation. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(3), 282-294. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.001.

Введение

Одним из направлений борьбы с контактной усталостью и износом металла рельс, являющимися главными причинами изъятия рельсов, является использование перлитных сталей с увеличенным, до заэвтектоидного уровня, содержанием углерода [1-5]. На некоторых грузонапряженных железных дорогах США, Бразилии и Австралии, где допустимы осевые нагрузки до 40 т, все шире используют рельсы из заэвтектоидной стали с минимальной твердостью 400 HB (по Бринеллю). В РФ начиная с 2018 г. на АО «Евраз-ЗСМК» изготавливаются рельсы категории ДТ400ИК с повы-

шенным комплексом эксплуатационных свойств. [6] для эксплуатации в сложных условиях Забайкальской и Восточно-Сибирской железных дорог со сложным профилем пути и малыми радиусами кривизны.

Начиная с классических работ Украинской школы металлофизиков по деформационному поведению высокоуглеродистых сталей, отмечается, что одним из основных аспектов преобразования структуры является разрушение пластин цементита в колониях перлита [7-9]. В научной литературе обсуждаются преимущественно два механизма: разрушение путем разрезания пластин цементита скользящими дислокациями (деформационный механизм) и раз-

рушение в результате перемещения атомов углерода из кристаллической решетки цементита на дислокации (механизм недиффузионной природы) [10-13]. Пластинчатый перлит обусловлен жестким каркасом цементитных пластин, что делает его предпочтительным для деталей, работающих на износ [14-16]. Глобулярный перлит отличается более высокой пластичностью, вязкостью и обрабатываемостью резанием, но меньшей износостойкостью.

С помощью совместного применения высокоинформативных методов дифракционной электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии изучен распад пластин цементита высокоуглеродистой стали при контактной усталости и интенсивной пластической деформации [17-18].

В работах по молекулярно-динамическому моделированию поведения высокоуглеродистых сплавов показано, что начало пластической деформации определяется зарождением дислокаций на межфазной границе, а миграция дислокаций в цементитную фазу приводит к усталостному разрушению моделируемого образца [24-26].

Особая роль межфазной границы α -фаза – цементит в процессах разрушения частиц карбида Fe_3C подчеркивалась в работе [10]. Когерентная или полукогерентная граница облегчает проникновение дислокаций из α -фазы в цементит и обратно и тем самым способствует разрушению и растворению карбида. Некогерентная большеугольная межфазная граница стабилизирует структуру карбида и оставляет возможность лишь диффузионного массопереноса.

Для рельсов из доэвтектоидной стали после эксплуатации на экспериментальном кольце РЖД с пропущенным тоннажем 692,9; 1411 и 1770 млн. тонн брутто. Выявлено, что на заключительном этапе растворения цементита весь объем материала, ранее занимаемый цементитной пластиной, заполняется наноразмерными частицами [6]. В литературе практически отсутствуют данные о поведении цементита Fe_3C и свойств рельсов из заэвтектоидной стали при длительной эксплуатации в реальных условиях. Это затрудняет реализацию Постановления Правительства Российской Федерации о производстве рельсов с гарантированным пропущенным тоннажем 2-2,5 млрд тонн брутто. Решение этой проблемы возможно лишь

при формировании банка закономерностей формирования структуры, фазового состава, дефектной субструктуры и механизмов упрочнения методами современного физического материаловедения. При этом анализ поведения цементита является определяющим.

Целью настоящей работы является исследование механизмов и стадий разрушения цементита в головке рельсов из заэвтектоидной стали после эксплуатации в сложных условиях Восточно-Сибирской железной дороги.

Материал и методики исследования

Материалом исследования являлся фрагмент рабочей выкружки рельса категории ДТ400ИК, изготовленного на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в ноябре 2023 года в соответствии с ГОСТ Р 51685-2022 и ТУ 24.10.75.111-298-05757676-2017, подвергнутого дифференцированной закалке. Грузонапряженность на этом участке на дату изъятия составила 170,7 млн. т брутто в год, пропущенный тоннаж 175,9 млн. т брутто. Боковой износ рельса составляет 16,2 мм (Согласно инструкции РЖД [1] такой износ сверхдопустимых норм), вертикальный износ – 0 мм (рис. 1, а). Химический состав исследуемого рельса приведен в табл. 1.

Исследованию фазового состава и дефектной субструктуры подвергался слой металла рельс, расположенный на глубине 2 мм и 10 мм по радиусу скругления выкружки, а также поверхностного слоя (0 мм) выкружки (рис. 1, б, в).

Фазовый состав металла рельс изучали методами рентгенофазового анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8Н. Идентификация фазового состава, качественный и количественный фазовый анализ, а также уточнение параметров структуры выполнены при помощи программного комплекса «КДА – Кристаллография и дифракционный анализ» со встроенной картотекой порошковых стандартов (АО ИЦ «Буревестник», версия 2023-01-24-144022.8dec10c0f).

Исследование структуры металла выкружки рельса осуществляли методами оптической микроскопии (прибор микровизор металлографический $\mu\text{Vizo-MET-221}$), сканирующей (прибор КУКУ-ЕМ6900) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100 JEOL) электронной микроскопии [27-29].

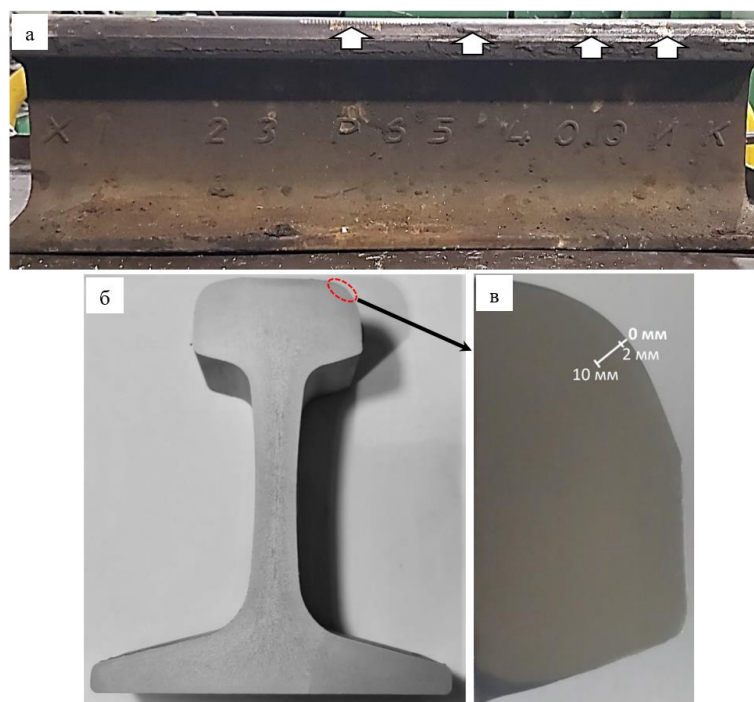


Рис. 1. Схема препарирования фрагмента рельс. Стрелками на (а) указаны дефекты на боковой поверхности (выкружке) рельса.

Fig. 1. Diagram of rail fragment preparation. Arrows in (a) indicate defects on the side surface (corner) of the rail.

Таблица 1. Химический состав металла исследуемого рельса, определенный спектральным и химическим методами (Fe - остальное)

Table 1. Chemical composition of the metal of the rail under study, determined by spectral and chemical methods (Fe - the rest)

Материал	Содержание химических элементов, вес. %											
	C	Mn	Si	V	N	P	S	Al	Ti	Ni	Cu	Cr
Проба	0,92	0,81	0,41	0,10	0,012	0,011	0,004	0,003	0,003	0,15	0,08	0,34

Результаты исследования и их обсуждение

Морфология цементита (форма, размер, количество и расположение в объеме зерна) оказывает существенное влияние на механические свойства стали, что позволяет на практике для каждого конкретного применения сплава добиваться оптимального сочетания твёрдости, прочности, стойкости к хрупкому разрушению [14-16]. Исследования, выполненные в настоящей работе, показали, что основной формой цементита выкружки являются пластины различной протяженности и толщины, формирующие структуру перлита.

В единичных случаях в исследуемой стали выявляются области с менее регулярной, по сравнению с пластинчатым перлитом, структурой и структура пластинчатого перлита, содержащего частицы цементита глобулярной формы размерами (56-85) нм. Достаточно редко в исследуемой стали обнаруживаются зерна феррита и включения цементита сложной формы, расположенные по границам бывших зерен аустенита.

На глубине 10 и 2 мм от поверхности выкружки по радиусу скругления выявляются области с разрушенными пластинами цементита, который фрагментирован. Размеры фрагментов составляют 10-12 нм. Процессы фрагментации и разрушения интенсифицируются по мере приближения к поверхности выкружки.

Исследования поверхностного слоя выкружки выявили ряд характерных особенностей структуры и фазового состава стали. В поверхностном слое выкружки методами рентгенофазового анализа однозначно фиксируются лишь дифракционные линии α -фазы, дифракционные линии цементита не выявляются. В поверхностном слое наблюдаются области с субзеренной структурой α -фазы. Субзерна имеют глобулярную форму, размер субзерен изменяется в пределах от 60 нм до 125 нм. Субзеренная структура в слое, расположенном на глубине 10 мм, не наблюдается. Циклическая контактная нагрузка, имеющая место при эксплуатации рельс на железной дороге, приводит к разрушению пластин цементита перлитных колоний. Как и для высокоуглеродистых сталей и рельсов из доэвтектоидной стали выявлены два механизма: разрушение путем разрезания пластин цементита скользящими дислокациями (деформационный механизм) и разрушение в результате перемещения атомов углерода из кристаллической решетки цементита на дислокации (механизм недиффузионной природы) [6, 21-23]. При реализации деформационного механизма, т.е. путем разрезания пластин цементита скользящими дислокациями пластины цементита делятся на несколько отдельных участков, которые сдвигаются друг относительно друга.

Разрушение карбидной фазы по механизму недиффузионной природы, основанному на перемещении атомов углерода из кристаллической решетки цементита на дислокации сопровождается перераспределением атомов углерода и оказывает влияние на свойства металла рельсов. Аспекты, связанные с перемещением атомов углерода в условия интенсивных деформационных воздействий, представляют особый интерес и требуют привлечения адекватных механизмов, их объясняющих [11-16].

Согласно классическим представлениям диффузия углерода протекает в поле напряжений, создаваемом дислокационной субструктурой, которая формируется вокруг пластин цементита. При этом степень распада цементита, как правило, определяется величиной плотности дислокаций и типом субструктуры [10-13]. При «вытягивании» атомов углерода из кристаллической решетки цементита наблюдается

изменение дефектной субструктуры карбида из-за стремления дислокаций проникнуть в решетку цементита. Однако некогерентная межфазная граница α -Fe-Fe₃C этому препятствует, оставляя возможным лишь диффузионный массоперенос. Он может быть реализован различными механизмами, обсуждаемыми в [30, 31]: диффузией по междоузлиям и по деформационным вакансиям.

По мере приближения к поверхности выкружки преобладающим становится второй механизм разрушения, заключающийся в вытягивании в процессе эксплуатации дислокациями атомов углерода из решетки карбидной фазы с образованием атмосфер Коттрелла [16, 32]. 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 субструктуры.

Затем, вследствие вытягивания атомов углерода из кристаллической 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 (рис. 2).

Кроме этого, наноразмерные частицы карбидной фазы наблюдаются и в ферритной матрице, заполняющей межпластинчатое пространство перлитных колоний. Данные частицы могут быть вынесены туда в процессе дислокационного скольжения, либо, что менее вероятно, они могут образоваться в процессе деформационного распада твердого раствора углерода в кристаллической решетке железа. Разрушаемая таким образом пластина цементита теряет свою первоначальную форму; в окружающем ее пространстве феррита наблюдается большое количество наноразмерных (8-15 нм) частиц цементита округлой формы, расположенных на линиях дислокаций. Стадийность разрушения пластин цементита может быть проиллюстрирована следующим образом.

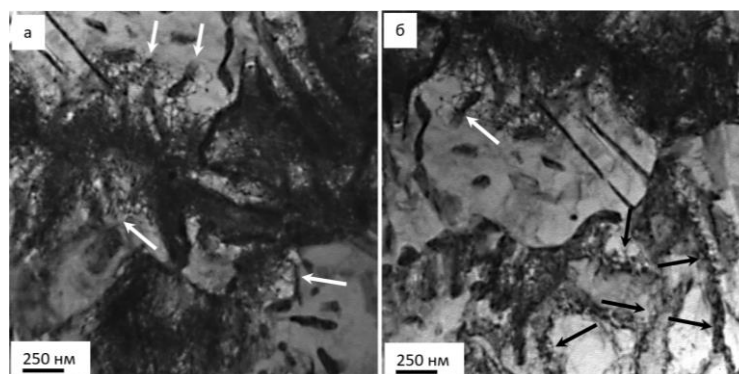


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали с разрушенным, по механизму растворения, цементитом. Начальная стадия растворения.

Fig. 2. Electron microscopic image of the structure of steel with cementite destroyed by the dissolution mechanism. Initial stage of dissolution.

Первая стадия растворения пластин цементита – пластина разбивается на наноразмерные фрагменты (рис. 3). На данной стадии растворения пластин цементита наблюдается формирование вдоль пластин протяженных областей измененного контраста (рис. 4). Частиц цементита в пластинах феррита не наблюдаются. Вторая стадия характеризуется формированием структуры, в которой пластины цементита про-

сматриваются слабо (рис. 5). В объеме пластин феррита наблюдается большое количество наноразмерных частиц карбидов железа (рис. 6). Третья стадия характеризуется формированием субзеренной структуры феррита. По границам субзерен располагаются частицы карбидной и оксидной фаз. Структура пластинчатого перлита не выявляется (рис. 7).

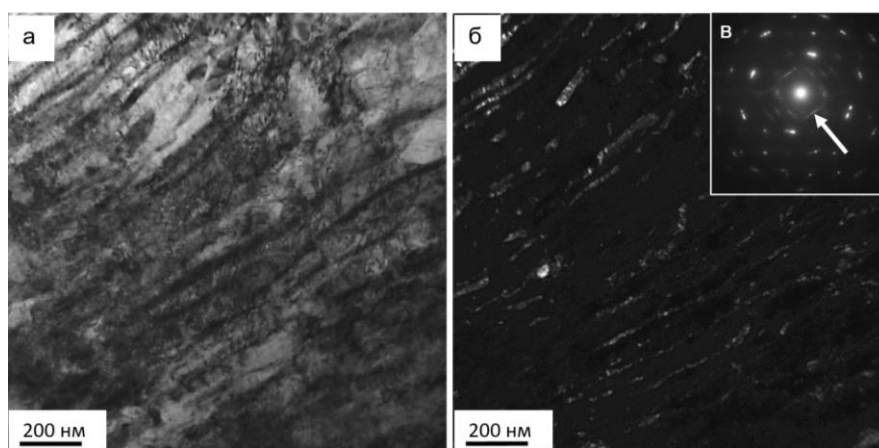


Рис. 3. ПЭМ изображение блочной субструктуры пластин цементита колонии перлита поверхностного слоя выкружки; а – светлое поле; б – темное поле, полученное в рефлекс $211\text{Fe}_3\text{C}$; в – микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле.

Fig. 3. TEM image of the block substructure of cementite plates in a pearlite colony of the fillet surface layer; a – bright field; b – dark field obtained in the $211\text{Fe}_3\text{C}$ reflection; c – microelectron diffraction pattern, the arrow indicates the reflection in which the dark field was obtained.

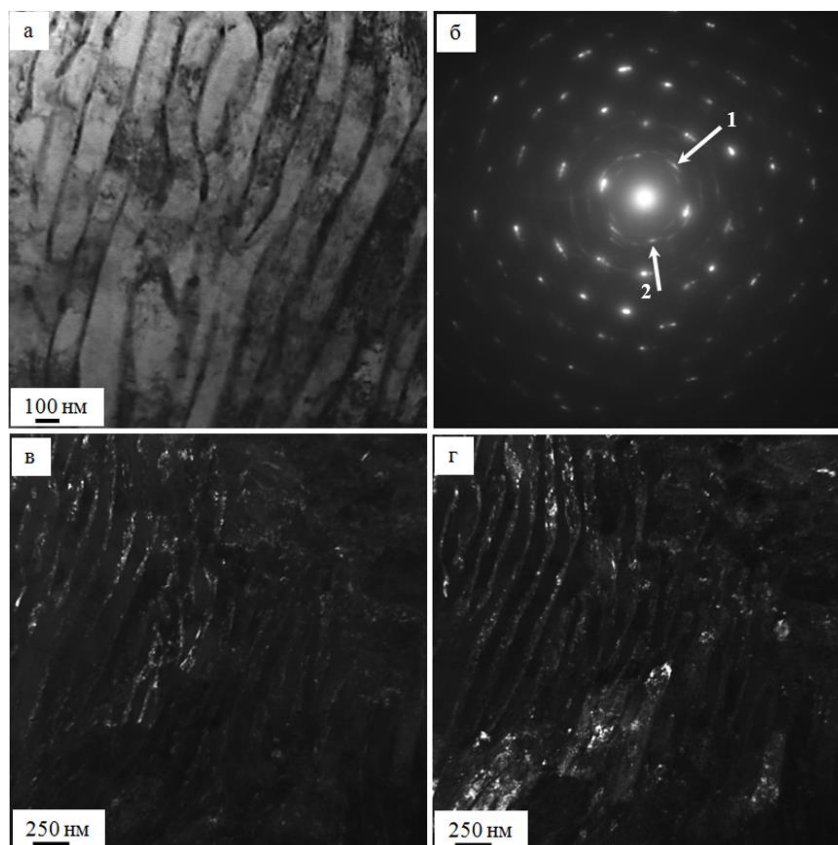


Рис. 4. ПЭМ изображение субструктуры пластинчатого перлита поверхностного слоя металла выкружки на первой стадии растворения цементита; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $211\text{Fe}_3\text{C}$ (в) и $110\alpha\text{-Fe} + 211\text{Fe}_3\text{C}$ (г).

Fig. 4. TEM image of the substructure of lamellar pearlite of the surface layer of the fillet metal at the first stage of cementite dissolution; а – bright field; б – microelectron diffraction pattern, the arrow indicates the reflection in which the dark field was obtained; c, d – dark fields obtained in the reflections $211\text{Fe}_3\text{C}$ (c) and $110\alpha\text{-Fe} + 211\text{Fe}_3\text{C}$ (d).

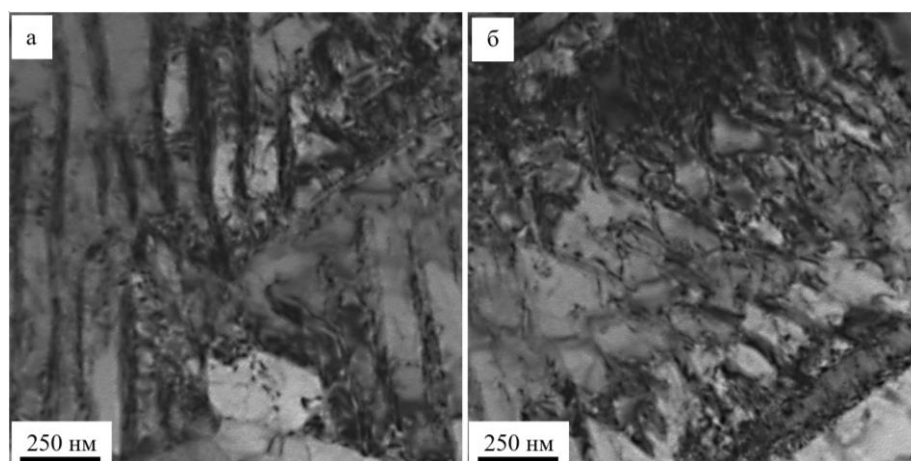


Рис. 5. ПЭМ изображение структуры стали с разрушенным, по механизму растворения, цементитом. Стадия II.

Fig. 5. TEM image of the structure of steel with cementite destroyed by the dissolution mechanism. Stage II.

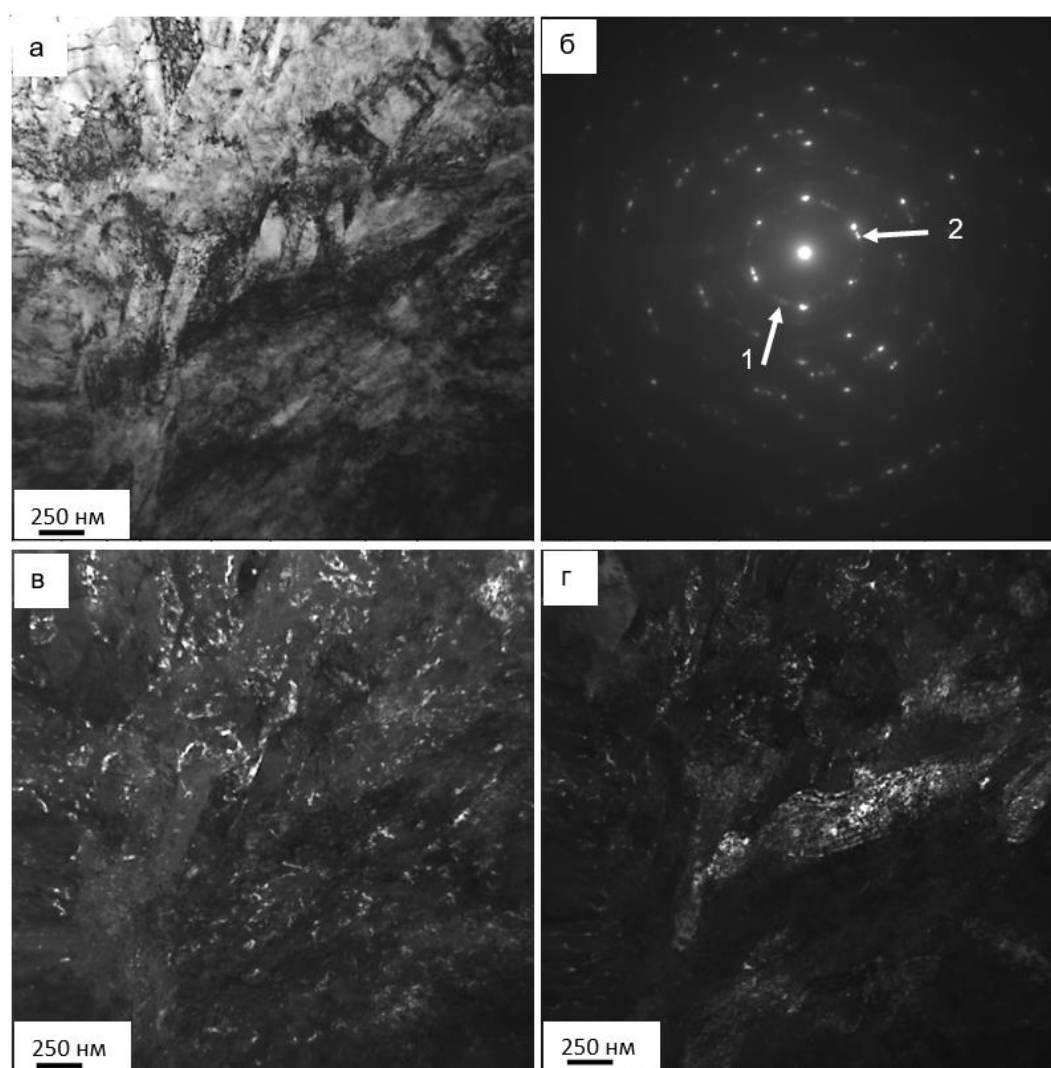


Рис. 6. ПЭМ изображение субструктуры пластинчатого перлита поверхностного слоя металла выкружки на второй стадии растворения цементита; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $211\text{Fe}_3\text{C}$ (в) и $011\alpha\text{-Fe} + 031\text{Fe}_3\text{C}$ (г).

Fig. 6. TEM image of the substructure of lamellar pearlite of the surface layer of the fillet metal at the second stage of cementite dissolution; а – bright field; б – microelectron diffraction pattern, the arrow indicates the reflection in which the dark field was obtained; c, d – dark fields obtained in the reflections $211\text{Fe}_3\text{C}$ (c) and $011\alpha\text{-Fe} + 031\text{Fe}_3\text{C}$ (d).

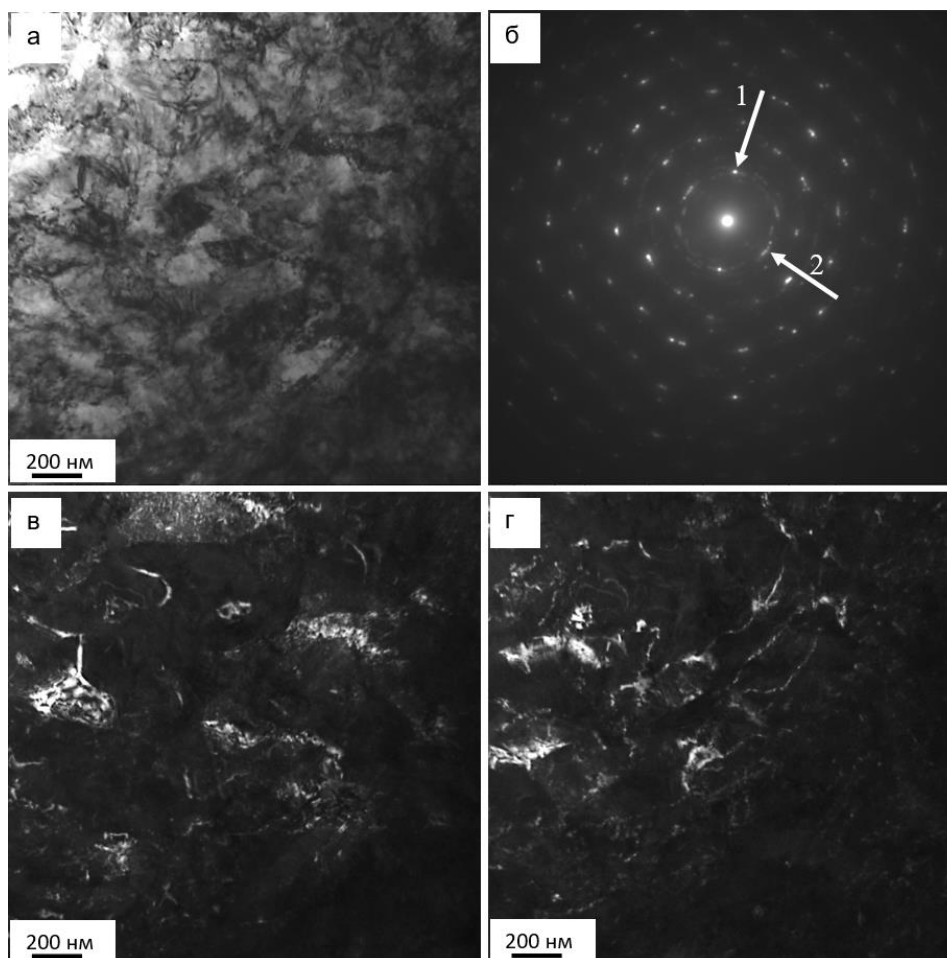


Рис. 7. ПЭМ изображение субзеренной структуры поверхностного слоя металла выкружки на третьей стадии растворения цементита; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле (1 для (в); 2 – для (г)); в, г – темные поля, полученные в рефлексах $011\alpha\text{-Fe}$ (в); $(-111)\text{Fe}_2\text{C} + 200\text{FeO} + 011\alpha\text{-Fe}$ (г).

Fig. 7. TEM image of the subgrain structure of the surface layer of the fillet metal at the third stage of cementite dissolution; а – bright field; б – microelectron diffraction pattern, the arrow indicates the reflection in which the dark field was obtained (1 for (c); 2 – for (d)); c, d – dark fields obtained in reflections $011\alpha\text{-Fe}$ (c); $(-111)\text{Fe}_2\text{C} + 200\text{FeO} + 011\alpha\text{-Fe}$ (d).

Таким образом, на заключительной стадии, соответствующей стадии формирования усталостно-контактных трещин на поверхности выкружки, пластинчатый перлит полностью разрушается, преобразуясь в зеренно-субзеренную структуру на основе твердого раствора α -фазы. В объеме и на границах зерен и субзерен такой структуры выявляются наноразмерные частицы цементита округлой (глобулярной) формы, т.е. формируется глобулярный перлит с наноразмерными частицами цементита. Таким образом одним из основных механизмов усталостно-контактного разрушения рельсовой стали в процессе эксплуатации на железной дороге является преобразование зерен пластинчатого

перлита, а именно, разрушение пластин цементита и формирование глобулярного перлита. Можно предположить, что дополнительное легирование стали элементами, стабилизирующими цементит, позволит продлить срок службы рельсов.

Заключение

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выявлены механизмы и стадии разрушения пластинчатого перлита в головке рельсов из заэвтектоидной стали после длительной эксплуатации на Восточно-Сибирской железной дороге: разрушение пластин цементита скользящими дислока-

циями и перемещение атомов углерода из кристаллической решетки цементита на дислокации. Показано, что на заключительной стадии разрушения в объеме зерен перлита формируется субзеренная структура с распределенными по границам субзерен наноразмерных частиц карбидной фазы. Высказаны предположения об основных механизмах контактно-усталостного разрушения рельсов в сложных условиях Восточно-Сибирской железной дороги.

Список литературы

1. Bai W., Zhou L., Wang P., Hu Y., Wang W., Ding H., Han Z., Xu X., Zhu M. Damage behavior of heavy-haul rail steels used from the mild conditions to harsh conditions // *Wear*. 2022. Vol. 496-497. P. 204290. DOI:10.1016/j.wear.2022.204290
2. Ma L., Guo J., Liu Q.Y., Wang W.J. Fatigue crack growth and damage characteristics of high-speed rail at low ambient temperature // *Eng. Failure Analysis*. 2017. Vol. 82. P. 802-815. DOI:10.1016/j.engfailanal.2017.07.026
3. Hu Y., Guo L.C., Maiorino M., Liu J.P., Ding H. H., Lewis R., Meli E., Rindi A., Liu Q. Y., Wang W. J. Comparison of wear and rolling contact fatigue behaviours of bainitic and pearlitic rails under various rolling-sliding conditions // *Wear*. 2020. Vol. 460-461. P. 203455. DOI:10.1016/j.wear.2020.203455
4. Hu Y., Zhou L., Ding H.H., Lewis R., Liu Q. Y., Guo J., Wang W.J. Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading // *Tribology International*. 2021. Vol. 154. P. 106685. DOI:10.1016/j.triboint.2020.106685
5. Zhou L., Bai W., Han Z., Wang W., Hu Yu., 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. Vol. 492-493. P. 204233. DOI:10.1016/j.wear.2021.204233
6. Громов В.Е., Юрьев А.Б., Юрьев А.А., Коновалов С.В., Порфирьев М.А., Серебрякова А.А. Антология структурно-фазовых состояний и свойств российских рельсов XXI века. Новокузнецк: «Полиграфист», 2024. 181 с.
7. Gavriljuk V.G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires // *Scripta. Mater.* 2001. Vol. 45. № 12. P. 1469-1472.
8. Fang F., Zhao Y., Liu P., Zhou L., Hub X., Zhou X., Xie Z. Deformation of cementite in cold drawn pearlitic steel wire // *Materials Science and Engineering A*. 2014. Vol. P. 11-15.
9. Qin Y., Mayweg D., Tung P-Y., Pippan R., Herbig M. Mechanism of cementite decomposition in 100Cr6 bearing steels during high pressure torsion // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 201. Pp. 79-93.
10. Tselliermaer V.Ya. Substructural and phase transformations during intense plastic deformation of metals // *Steel Trans.* 1999. Vol. 29. No. 12. P. 75-81.
11. Гаврилюк В.Г., Герцрикен Д.С., Полушкин Ю.А., Фальченко В.М. Механизм распада цементита при пластической деформации стали // *ФММ*. 1981. Т. 51. № 1. С. 147-152.
12. Гриднев В.Н., Гаврилюк В.Г. Распад цементита при пластической деформации стали // *Металлофизика*. 1982. Т. 4. № 3. С. 74-87.
13. Gavriljuk V.G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation // *Mater. Sci. Eng.: A*. 2003. Vol. 345. No. 1-2. P. 81-89. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00358-1
14. Тушинский Л.И. Структурная теория конструктивной прочности. Новосибирск: НГТУ, 2004. 399 с.
15. Перлит в углеродистых сталях. – Колл. авторов. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 312 с.
16. Счастливцев В.М., Медведева Н.И., Крапошин В.С. и др. Цементит в углеродистых сталях // Институт физики металлов. Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2017. 380 с.
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. Vol. 216. P. 117144.
18. Qin Y., Mayweg D., Tung P-Y., Pippan R., Herbig M. Mechanism of cementite decomposition in 100Cr6 bearing steels during high pressure torsion // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 201. P. 79-93.
19. Карькина Л.Е., Карькин И.Н., Кузнецов А.Р., Кабанова И.Г. Атомистическое моделирование дефектов упаковки и расщепление дислокаций в цементите // Издательство УМЦ УПИ. 2017. С. 80-147.
20. Карькина Л.Е., Кузнецов А.Р., Карькин И.Н. Предельная теоретическая прочность цементита в плоскостях (100), (010) и (001) // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2016. I. 5. P. 67-76.
21. Карькина Л.Е., Карькин И.Н., Кузнецов А.Р. Атомистическое моделирование дефектов

упаковки в цементе // Фазовые переходы, межфазные границы и наноматериалы. 2014. № 3. С. 118-121.

22. Shimokawa T., Niiyama T., Okabe M., Sawakoshi J. Interfacial-dislocation-controlled deformation and fracture in nanolayered composites: toward higher ductility of drawn pearlite // *Acta Materialia*. 2019. Vol. 164. P. 602-617.

23. Liang L.W., Wang Y.J., Chen Y., Wang H.Y., Dai L.H. Dislocation nucleation and evolution at the ferrite-cementite interface under cyclic loadings // *Acta Materialia*, 2020. Vol. 186. P. 267-277.

24. Guziewski M., Coleman S.P., Weinberger C.R. Atomistic investigation into interfacial effects on the plastic response and deformation mechanisms of the pearlitic microstructure // *Acta Mater.* 2019. Vol. 180. P. 287-300.

25. Kim J., Ghaffarian H., Ryu S., Kang K. The effect of the misfit dislocation on the in-plane shear response of the ferrite/cementite interface // *Comp. Mater Science*. 2020. Vol. 173. P. 109375.

26. Saitoh K., Oda K., Yoshida K., Takuma M., Takahashi Y., Sato T. Atomistic simulation of heavily plastic deformation of pearlitic steel: nano-sized processes of wire drawing and indentation // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 461. P. 012074.

27. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. – Basel: Springer, 2016. 575 p.

28. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy Characterization of Nanomaterials*. – New York: Springer, 2014. 492 p.

29. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. – Berlin: Springer, 2016. 618 p.

30. Li Y.J., Choi P., Borchers C., Westerkamp S., Goto S., Raabe D., Kirchheim R. Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite // *Acta Mater.* 2011. Vol. 59. № 10. P. 3965-3977. DOI:10.1016/j.actamat.2011.03.022

31. Gavriljuk V.G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires // *Scripta Mater.* 2001. Vol. 45. № 12. P. 1469-1472. DOI: 10.1016/S1359-6462(01)01185-X

32. Chen H., Ji Y., Zhang C., Liu W., Chen H., Yang Z., Chen L.Q., Chen L. Understanding cementite dissolution in pearlitic steels subjected to rolling-sliding contact loading: A combined experimental and theoretical study // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 141. P. 193-205.

Информация об авторах

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

О. В. Шугаев – старший преподаватель кафедры транспорта и логистики Сибирского государственного индустриального университета.

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

И. Ю. Литовченко – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией материаловедения сплавов с памятью формы, руководитель ЦКП «НАНОТЕХ» Института физики прочности и материаловедения СО РАН.

А. Б. Юрьев – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК Сибирского государственного индустриального университета.

Ю. А. Шлярова – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений (ЭМуОИ) Сибирского государственного индустриального университета.

References

1. Bai, W., Zhou, L., Wang, P., Hu, Y., Wang, W., Ding, H., Han, Z., Xu, X., & Zhu, M. (2022). Damage behavior of heavy-haul rail steels used from the mild conditions to harsh conditions. *Wear*. 496-497, 204290. DOI:10.1016/j.wear.2022.204290
2. Ma, L., Guo, J., Liu, Q.Y., & Wang, W.J. (2017). Fatigue crack growth and damage characteristics of high-speed rail at low ambient temperature. *Eng. Failure Analysis*. 82, 802-815. DOI:10.1016/j.engfailanal.2017.07.026
3. Hu, Y., Guo, L.C., Maiorino, M., Liu, J.P., Ding, H. H., Lewis, R., Meli, E., Rindi, A., Liu, Q. Y., & Wang, W.J. (2020). Comparison of wear and rolling contact fatigue behaviours of bainitic and pearlitic rails under various rolling-sliding conditions. *Wear*. 460-461, 203455. DOI:10.1016/j.wear.2020.203455
4. Hu, Y., Zhou, L., Ding, H.H., Lewis, R., Liu, Q.Y., Guo, J., & Wang, W.J. (2021). Micro-

- structure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading. *Tribology International*. 154, 106685. DOI:10.1016/j.triboint.2020.106685
5. Zhou, L., Bai, W., Han, Z., Wang, W., Hu, Yu., 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. DOI:10.1016/j.wear.2021.204233
6. Gromov, V.E., Yuriev, A.B., Yuriev, A.A., Kononov, S.V., Porfirev, M.A., & Serebryakova, A.A. (2024). Anthology of structural and phase states and properties of Russian rails of the XXI century. Novokuznetsk: "Polygraphist". P. 181. (In Russ.).
7. Gavriljuk, V.G. (2001). Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires. *Scripta Mater*. 45(12), 1469–1472.
8. Fang, F., Zhao, Y., Liu, P., Zhou, L., Hub, X., Zhou, X., & Xie, Z. (2014). Deformation of cementite in cold drawn pearlitic steel wire. *Materials Science and Engineering A*. 11-15.
9. Qin, Y., Mayweg, D., Tung, P.-Y., Pippan, R., & Herbig, M. (2020). Mechanism of cementite decomposition in 100Cr6 bearing steels during high pressure torsion. *Acta Materialia*. 201, 79–93.
10. Tsellmer, V.Ya. (1999). Substructural and phase transformations during intense plastic deformation of metals. *Steel Trans*. 9(12), 75-81.
11. Gavriljuk, V.G., Gertsriken, D.S., Polushkin, Yu.A., & Falchenko, V.M. (1981). Mechanism of cementite decomposition during plastic deformation of steel. *FMM*. 51(1), 147-152. (In Russ.).
12. Gridnev, V.N., & Gavriljuk, V.G. (1982). Decomposition of cementite during plastic deformation of steel. *Metallophysics*. 4(3), 74-87. (In Russ.).
13. Gavriljuk, V.G. (2003). Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation. *Mater. Sci. Eng.: A*. 345(1-2), 81–89. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00358-1
14. Tushinsky, L.I. (2004). Structural theory of structural strength Novosibirsk: NSTU. P. 399. (In Russ.).
15. Pearlite in carbon steels. – Coll. of authors. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, (2006). P. 312. (In Russ.).
16. Schastlivtsev, V.M., Medvedeva, N.I., Kraposhin, V.S. et al. (2017). Cementite in carbon steels. Institute of Metal Physics. Ekaterinburg: Publishing House of UMC UPI. P. 380. (In Russ.).
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. Qin, Y., Mayweg, D., Tung, P.-Y., Pippan, R., & Herbig, M. (2020). Mechanism of cementite decomposition in 100Cr6 bearing steels during high pressure torsion. *Acta Materialia*. 201, 79–93.
19. Kar'kina, L.E., Kar'kin, I.N., Kuznetsov, A.R., & Kabanova, I.G. (2017). Atomistic modeling of stacking faults and splitting of dislocations in cementite. *Publishing house of UMC UPI*. 80-147. (In Russ.).
20. Kar'kina, L.E., Kuznetsov, A.R., & Kar'kin, I.N. (2016). Ultimate theoretical strength of cementite in planes (100), (010) and (001). *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 5, 67-76. (In Russ.).
21. Kar'kina, L.E., Kar'kin, I.N., & Kuznetsov, A.R. (2014). Atomistic modeling of stacking faults in cementite. *Phase transitions, interphase boundaries and nanomaterials*. 3, 118-121. (In Russ.).
22. Shimokawa, T., Niiyama, T., Okabe, M., & Sawakoshi, J. (2019). Interfacial-dislocation-controlled deformation and fracture in nanolayered composites: toward higher ductility of drawn pearlite. *Acta Materialia*. 164, 602-617.
23. Liang, L.W., Wang, Y.J., Chen, Y., Wang, H.Y., & Dai, L.H. (2020). Dislocation nucleation and evolution at the ferrite-cementite interface under cyclic loadings. *Acta Materialia*. 186, 267–277.
24. Guziewski, M., & Coleman, S.P., Weinberger, C.R. (2019). Atomistic investigation into interfacial effects on the plastic response and deformation mechanisms of the pearlitic microstructure. *Acta Mater*. 180, 287–300.
25. Kim, J., Ghaffarian, H., Ryu, S., & Kang, K. (2020). The effect of the misfit dislocation on the in-plane shear response of the ferrite/cementite interface. *Comp. Mater Science*. 173, 109375.
26. Saitoh, K., Oda, K., Yoshida, K., Takuma, M., Takahashi, Y., & Sato, T. (2019). Atomistic simulation of heavily plastic deformation of pearlitic steel: nano-sized processes of wire drawing and indentation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 461, 012074.
27. Egerton, F.R. (2016). Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer. P. 575.

28.Kumar, C.S.S.R. (2014). Transmission Electron Microscopy Characterization of Nanjmaterials. New York: Springer. P. 492.

29.Carter, C.B., & Williams, D.B. (2016). Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer. P. 618.

30.Li, Y.J., Choi, P., Borchers, C., Westerkamp, S., Goto, S., Raabe, D., & Kirchheim, R. (2011). Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite. *Acta Mater.* 59(10), 3965–3977. DOI:10.1016/j.actamat.2011.03.022

31.Gavriljuk, V.G. (2001). Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires. *Scripta Mater.* 45(12), 1469-1472. DOI: 10.1016/S1359-6462(01)01185-X

32.Chen, H., Ji, Y., Zhang, C., Liu, W., Chen, H., Yang, Z., Chen, L.Q., & Chen, L. (2017). Understanding cementite dissolution in pearlitic steels subjected to rolling-sliding contact loading: A combined experimental and theoretical study. *Acta Materialia*. 141, 193-205.

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 of the Siberian State Industrial University.

O. V. Shugaev –senior lecturer at the Department of Transport and Logistics of the Siberian State Industrial University.

Yu. F. Ivanov – doctor of physical and mathematical sciences, professor, chief researcher of the Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

I. Yu. Litovchenko – doctor of physical and mathematical sciences, head of the laboratory of materials science of shape memory alloys, head of the NANOTECH Shared Use Center of the Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

A. B. Yuryev – doctor of Engineering Sciences and Professor in the Department of Metal Forming and Materials Science at EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University.

Yu. A. Shlyarova – Candidate of Engineering Sciences and a research associate in the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing (EMIIP) at Siberian State Industrial University.

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

Статья поступила в редакцию 27.05.2026; одобрена после рецензирования 07.09.2026; принята к публикации 14.09.2026.

The article was received by the editorial board on 27 May 2026; approved after reviewing 07 Sep. 2026; accepted for publication 14 Sep. 2026.