

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Научно-технический журнал

Издается с января 1958 г. ежемесячно

2023 Том 66 № 1
Vol. No.

IZVESTIYA FERROUS METALLURGY

Scientific and Technical Journal

Published since January 1958. Issued monthly

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Костина М.В., Ригина Л.Г., Костина В.С., Кудряшов А.Э., Федорцов Р.С. Обзор исследований коррозионностойких сталей на основе Fe – ~13 % Cr: термическая обработка, коррозионная- и износостойкость	8
Гошкодеря М.Е., Бобкова Т.И., Богданов С.П., Красиков А.В., Старицын М.В., Каширина А.А. Напыление износостойких покрытий из плакированных порошков TiB ₂ /Ti и HfB ₂ /Ti	27
Пышминцев И.Ю., Гизатуллин А.Б., Девятерикова Н.А., Лаев К.А., Цветков А.С., Альхименко А.А., Шапошников Н.О., Куракин М.К. Предварительная оценка возможности использования труб большого диаметра из стали X52 для транспортировки чистого газообразного водорода под давлением	35
Гойхенберг Ю.Н., Полухин Д.С., Жеребцов Д.А., Бодров Е.Г. Влияние карбидов кремния на структуру и свойства композитного никель-фосфорного покрытия	43
Громов В.Е., Аксёнова К.В., Иванов Ю.Ф., Кузнецов Р.В., Кормышев В.Е. Трансформация тонкой структуры пластинчатого перлита при деформации рельсовой стали	50
Акимов К.О., Иванов К.В., Фигурко М.Г., Овчаренко В.Е. Формирование зеренной структуры и микротвердости интерметаллического соединения Ni ₃ Al в результате СВС-экструзии	57
Тришкина Л.И., Клопотов А.А., Потекаев А.И., Черкасова Т.В., Бородин В.И. Параметры субструктуры в деформированных сплавах Cu – Mn с ГЦК решеткой	62

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Зинягин А.Г., Мунтин А.В., Крючкова М.О. Исследование сопротивления деформации трубных сталей в лабораторных условиях и по данным промышленных прокаток с использованием инструментов машинного обучения	70
Каплан М.А., Горбенко А.Д., Иванников А.Ю., Конушкин С.В., Михайлова А.В., Кирсанкин А.А., Баикин А.С., Сергиенко К.В., Насакина Е.О., Колмаков А.Г., Севостьянов М.А. Исследование характеристик сферического порошка, полученного методом плазменного распыления проволоки из коррозионностойкой стали 03X17N10M2	80
Бабайлов Н.А., Логинов Ю.Н., Полянский Л.И. Трещинообразование в брикетах из оксида магния	86

MATERIAL SCIENCE

Kostina M.V., Rigina L.G., Kostina V.S., Kudryashov A.E., Fedortsov R.S. Corrosion-resistant steels based on Fe – ~13 % Cr: Heat treatment, corrosion- and wear resistance. Review	8
Goshkoderya M.E., Bobkova T.I., Bogdanov S.P., Krasikov A.V., Staritsyn M.V., Kashirina A.A. Spraying wear-resistant coatings from clad powders TiB ₂ /Ti and HfB ₂ /Ti	27
Pyshmintsev I.Yu., Gizatullin A.B., Devyaterikova N.A., Laev K.A., Tsvetkov A.S., Al'khimenko A.A., Shaposhnikov N.O., Kurakin M.K. Preliminary assessment of the possibility to use large-diameter pipes of X52 steel for transportation of pure gaseous hydrogen under pressure	35
Goikhenberg Yu.N., Polukhin D.S., Zherebtsov D.A., Bodrov E.G. Influence of silicon carbides on the structure and properties of composite nickel-phosphorus coating ...	43
Gromov V.E., Aksenova K.V., Ivanov Yu.F., Kuznetsov R.V., Kormyshev V.E. Transformation of fine structure of lamellar pearlite under deformation of rail steel	50
Akimov K.O., Ivanov K.V., Figurko M.G., Ovcharenko V.E. Formation of grain structure and microhardness of Ni ₃ Al intermetallic compound as a result of SHS extrusion	57
Trishkina L.I., Klopotov A.A., Potekaev A.I., Cherkasova T.V., Borodin V.I. Substructure parameters in deformed Cu – Mn alloys with a FCC lattice	62

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

Zinyagin A.G., Muntin A.V., Kryuchkova M.O. Study of pipe steel resistance to deformation in laboratory conditions and on the data from industrial rolling with the use of machine learning tools	70
Kaplan M.A., Gorbenko A.D., Ivannikov A.Yu., Konushkin S.V., Mikhailova A.V., Kirsankin A.A., Baikin A.S., Sergienko K.V., Nasakina E.O., Kolmakov A.G., Sevost'yanov M.A. Investigation of spherical powder obtained by plasma spraying of wire from corrosion-resistant steel 03Kh17N10M2	80
Babailov N.A., Loginov YU.N., Polyanskii L.I. Cracking in magnesium oxide briquettes	86



УДК 669.539.382:669.17:625.1:539.4

DOI 10.17073/0368-0797-2023-1-50-56

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2373>



Оригинальная статья

Original article

ТРАНСФОРМАЦИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ПЛАСТИНЧАТОГО ПЕРЛИТА ПРИ ДЕФОРМАЦИИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

В. Е. Громов¹, К. В. Аксёнова¹✉, Ю. Ф. Иванов²,
Р. В. Кузнецов¹, В. Е. Кормышев¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический 2/3)

✉ 19krestik91@mail.ru

Аннотация. Дефектная субструктура поликристаллических тел обуславливает субструктурное упрочнение и механические свойства. Перлит, являющийся основной структурной составляющей рельсов, при деформационном воздействии подвергается значительному преобразованию, которое сопровождается целым рядом процессов. В настоящей работе методами современного физического материаловедения проведены исследования и анализ дефектной субструктуры перлита пластинчатой морфологии и свойств рельсовой стали, подвергнутой разрушению в условиях деформации одноосным растяжением плоских образцов. Установлено, что предел прочности изменяется от 1247 до 1335 МПа, а относительная деформация до разрушения – от 0,69 до 0,75. Наблюдается формирование трех зон поверхности разрушения: волокнистой, радиальной и зоны среза. Проанализированы их форма и размеры. Деформация рельсовой стали сопровождается разрушением пластин цементита колоний перлита и повторным выделением в объеме пластин феррита наноразмерных частиц третичного цементита размером приблизительно 8,3 нм. Основными механизмами разрушения пластин цементита являются разрезание и растворение. Дислокационная субструктура представлена хаотическим распределением дислокаций и их скоплениями. Скалярная плотность дислокаций в феррите увеличивается от $3,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ в исходном состоянии до $7,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ при разрушении. Деформация сопровождается формированием внутренних полей напряжений, проявляющихся в виде изгибных контуров экстинкции. Источниками полей напряжений являются границы раздела пластин цементита и феррита, а также границы зерен. Выявлена фрагментация пластин феррита и цементита. Средние размеры фрагментов цементита составляют 9,3 нм. В зоне разрушения образца рельсовой стали отмечено вращение зерен перлита, свидетельствующее о наличии ротационной моды деформации. На электронно-микроскопических изображениях пластин цементита наблюдается изменение контраста, что может быть связано с образованием атмосфер Коттрелла.

Ключевые слова: тонкая структура, перлит, деформация, эволюция, цементит, фрагментация

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-32-60001) и стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (проект СП-4517.2021.1).

Благодарности: Выражаем благодарность Е.А. Полевому за предоставленные образцы рельсовой стали и Н.А. Поповой за помощь в обсуждении результатов эксперимента.

Для цитирования: Громов В.Е., Аксёнова К.В., Иванов Ю.Ф., Кузнецов Р.В., Кормышев В.Е. Трансформация тонкой структуры пластинчатого перлита при деформации рельсовой стали. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023; 66(1): 50–56.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-50-56>

TRANSFORMATION OF FINE STRUCTURE OF LAMELLAR PEARLITE UNDER DEFORMATION OF RAIL STEEL

V. E. Gromov¹, K. V. Aksenova¹✉, Yu. F. Ivanov²,
R. V. Kuznetsov¹, V. E. Kormyshev¹

¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

² Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

 19krestik91@mail.ru

Abstract. The defective substructure of polycrystalline bodies causes substructural hardening and mechanical properties. Pearlite, which is the main structural component of rails, undergoes a significant transformation during deformation, which is accompanied by a number of processes. In this paper, the methods of modern physical materials science were used to study and analyze the defective substructure of pearlite of lamellar morphology and the properties of rail steel subjected to destruction under deformation conditions by single-axis stretching of flat samples. It was established that the ultimate strength varies from 1247 to 1335 MPa, and the relative deformation to failure – from 0.69 to 0.75. The formation of three zones of the fracture surface was observed: fibrous, radial and shear zones. Their shape and sizes were analyzed. Deformation of rail steel is accompanied by destruction of cementite plates of pearlite colonies and repeated release of nanoscale particles of tertiary cementite approximately 8.3 nm in size in the volume of ferrite plates. The main mechanisms of destruction of cementite plates are cutting and dissolution. The dislocation substructure is represented by a chaotic distribution of dislocations and their clusters. The scalar density of dislocations in ferrite increases from $3.2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ in the initial state to $7.9 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ when it is destroyed. Deformation is accompanied by formation of internal stress fields, manifested in the form of bending extinction contours. The sources of stress fields are the interface of cementite and ferrite plates, as well as grain boundaries. Fragmentation of ferrite and cementite plates was revealed. The average size of cementite fragments is 9.3 nm. In fracture zone of the rail steel sample, rotation of pearlite grains was noted, indicating the presence of a rotational mode of deformation. Electron microscopic images of cementite plates show a change in the contrast, which may be associated with the formation of Cottrell's atmospheres.

Keywords: fine structure, pearlite, deformation, evolution, cementite, fragmentation

Funding: The work was supported by a grant of the Russian Foundation for Fundamental Research (project No. 19-32-60001) and the scholarship of the President of the Russian Federation for young scientists and postgraduate students carrying out promising scientific research and developments in priority areas of modernization of the Russian economy (project SP-4517.2021.1).

Acknowledgments: The authors express their gratitude to E.A. Polevoi for providing the samples of rail steel and N.A. Popova for participation in discussion of the experimental results.

For citation: Gromov V.E., Aksenova K.V., Ivanov Yu.F., Kuznetsov R.V., Kormyshev V.E. Transformation of fine structure of lamellar pearlite under deformation of rail steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023; 66(1): 50–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-50-56>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных и наиболее общих видов упрочнения поликристаллических тел является субструктурное, обусловленное дефектной субструктурой, которая во многом определяет механические свойства материалов. Зарождение и развитие микротрещин в пластичных материалах тесно связано с эволюцией субструктуры [1, 2].

Значительное увеличение интенсивности движения железнодорожного транспорта и его грузонапряженности требует высокой эксплуатационной стойкости рельсов, изготавливаемых из перлитной стали. В процессе эксплуатации рельсы подвергаются значительным деформационным воздействиям, которые сопровождаются эволюцией структурно-фазового состояния перлита [3, 4]. Важность информации в этой области определяется глубиной понимания фундаментальных проблем физического материаловедения, с одной стороны, и практической значимостью – с другой. Прикладной характер связан с созданием качественных рельсов с высокими эксплуатационными свойствами, обеспечивающими безаварийную работу при пропущенном тоннаже свыше 2 млрд т брутто. Создание специальных видов рельсов для скоростных магистралей, низкотемпературной надежности, повышенной контактно-усталостной выносливости требует изучения зависимости упрочнения от структурного состояния рельсов перед деформацией, установления причинно-следственных связей между явлениями, определяющими деформационное поведение [3, 4].

В исходном состоянии рельсы содержат около 70 % перлита пластинчатой морфологии [5 – 7], деформация

которого сопровождается сложной трансформацией феррита и цементита [8, 9], обычно наблюдаемой методами просвечивающей электронной микроскопии. Основное внимание при этом уделяется деформационно индуцированному разрушению цементита [10 – 12], приводящему к росту концентрации углерода в феррите и дополнительному механизму упрочнения [13].

Целью настоящей работы являлся анализ дефектной субструктуры перлита пластинчатой морфологии рельсовой стали, разрушенной в условиях деформации одноосным растяжением плоских образцов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования использовали образцы рельсовой стали, свойства и элементный состав которой регламентируются ГОСТ Р 51685 – 2013. Химический состав рельсов категории ДТ350, % (по массе): С 0,73; Мн 0,75; Si 0,58; Р 0,012; S 0,007; Cr 0,42; Ni 0,07; Cu 0,13; Ti 0,003; Mo 0,006; V 0,04; Al 0,003; Ti 0,008; остальное – железо.

Механические испытания осуществляли путем одноосного растяжения плоских пропорциональных образцов в виде двухсторонних лопаток с размерами рабочей области лопаток 1,5×4,45×8,0 мм. Образцы вырезали из головки 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 производства АО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат». Деформацию одноосным растяжением осуществляли на испытательной машине Instron 3369 при скорости нагружения 1,2 мм/мин.

Структуру поверхности разрушения изучали методами сканирующей электронной микроскопии (при-

бор SEM 515 Philips). Дефектную субструктуру стали в зоне разрушения исследовали методами просвечивающей (метод тонких фольг) электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-2100 JEOL) [14 – 16]. Фольги для просвечивающего электронного микроскопа изготавливали с ионным утонением (установка Ion Slicer EM-091001S, утонение осуществляется ионами аргона) пластинок, вырезанных из разрушенных образцов на установке Isomet Low Speed Saw перпендикулярно поверхности разрушения. Методика измерения скалярной и избыточной плотности дислокаций не отличалась от описанной в работах [3, 4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные испытания показали, что предел прочности на разрыв изменяется в пределах от 1247 до 1335 МПа, деформация образцов при разрушении – от 0,69 до 0,75. Как правило, при деформации образцов растяжением на поверхности разрушения формируются три зоны: волокнистая (центральная часть образца); следующая за ней радиальная; по краю образца зона среза [17]. Волокнистая зона по форме является эллиптической с большой осью, параллельной длинным сторонам прямоугольника. Радиальная зона образцов, ширина которых значительно больше толщины, имеет вид шеврона или «елочки». Шевронные узоры часто связывают с нестабильным, относительно быстрым распространением трещины. Появление шевронного узора обусловлено несовпадением общего направления распространения трещины и кратчайшего направления от фронта трещины до свободной поверхности. В этом случае радиальные рубцы распространяются по направлению к свободной поверхности, формируя шевронные узоры [17]. Вершины V-образных шевронов направлены от очага разрушения.

Ранее в работах [2 – 4, 18] было показано, что в структуре исследуемой стали по морфологическому признаку выделяются следующие составляющие: зерна перлита пластинчатой морфологии, зерна феррито-карбидной смеси (зерна нерегулярного перлита) и зерна структурно свободного феррита (зерна феррита, в объеме которых нет частиц карбидной фазы). Основным типом структуры исследуемой стали являются зерна пластинчатого перлита, относительное содержание которых в материале 0,7; относительное содержание зерен феррито-карбидной смеси – 0,27; остальное – зерна структурно свободного феррита.

Как правило, структура пластинчатого перлита представлена чередующимися пластинами феррита (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа) и пластинами цементита (карбид железа состава Fe_3C , орторомбическая кристаллическая решетка) [19]. Разрушение стали в условиях одноосного растяжения плоских образцов не приводит к изменению морфологии материала. В зоне разруше-

ния и вдали от нее присутствуют зерна с характерной для перлита пластинчатой структурой. Изменение структуры стали выявляется на уровне дефектной подсистемы и сопровождается множественным преобразованием перлита.

При рассмотрении преобразования структуры пластин феррита установлено, что пластины феррита перлитных колоний фрагментируются, то есть разбиваются на области, разделенные малоугловыми границами. Деформация сопровождается формированием в объеме пластин феррита дислокационной субструктуры (рис. 1). Дислокации распределены хаотически или формируют скопления. Скалярная плотность дислокаций $7,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, в исходном состоянии – $3,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Деформация стали сопровождается формированием в образце полей напряжений. При исследовании материала методами электронной микроскопии тонких фольг внутренние поля напряжений проявляются в виде изгибных контуров экстинкции, располагающихся преимущественно в пластинах феррита. Источниками полей напряжений в исследуемой стали являются границы раздела пластин цементита и пластин феррита (рис. 2), а также границы раздела зерен. Следует отметить, что растяжение исследуемой стали сопровождается вращением зерен перлита, которое наиболее ярко проявляется в зоне разрушения образцов (рис. 2). Последнее позволяет предположить наличие в зоне разрушения образца ротационной моды деформации [20 – 22], что связано с формированием локальной кривизны решетки. В связи с этим можно полагать, что развитие подобного эффекта в рельсовой стали делает облегченным перемещение атомов углерода.

Деформация исследуемой стали сопровождается разрушением пластин цементита. В научной литературе обсуждаются два возможных механизма разрушения

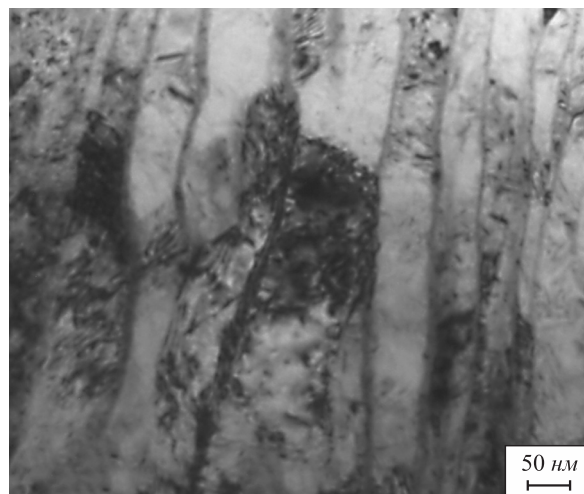


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение дислокационной субструктуры пластин феррита рельсовой стали

Fig. 1. Electron microscopic image of dislocation substructure of ferrite plates of rail steel

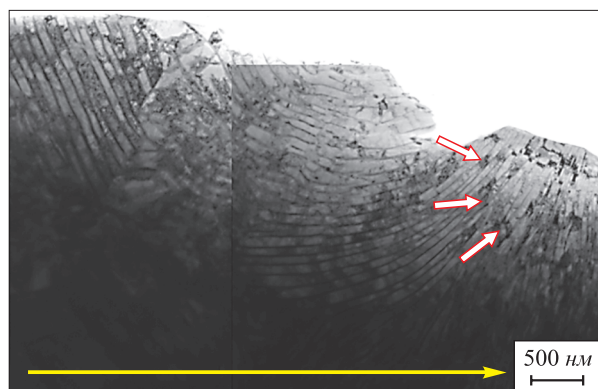


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры зерен перлита в зоне разрушения; стрелками указаны изгибные контуры экстинкции (длинной стрелкой обозначено направление растяжения образца (продольная ось образца))

Fig. 2. Electron microscopic image of pearlite grains structure in fracture zone: arrows indicate the bending contours of extinction (long arrow indicates the direction of the sample stretching (the sample longitudinal axis))

пластин цементита: разрезание и растворение [2, 3, 13]. Растворение пластин цементита происходит из-за большего значения энергии связи дислокаций с атомами углерода ($\sim 0,6 - 0,7$ эВ) по сравнению с энергией связи атомов углерода в решетке цементита [23 – 25]. Согласно результатам работы [26] увеличение свободной энергии, вызванное геометрическим утонением пластин цементита и образованием полос скольжения, дестабилизирует цементит и обеспечивает его разрушение. Подобная термодинамическая модель, основанная на эффекте Гиббса-Томсона и диффузионно-

контролируемом процессе растворения, предложена в работе [27]. Атомы углерода выносятся движущимися дислокациями в объем пластин феррита с последующим формированием наноразмерных частиц карбида железа (рис. 3). Средний размер частиц, расположенных в пластинах феррита – 8,3 нм. Наиболее отчетливо частицы такого размера обнаруживаются при использовании методики темнопольного анализа (рис. 3, б).

Растворение цементита сопровождается формированием вокруг пластин области материала, отличающейся от основного объема зерна контрастом (рис. 4, а). Можно предположить, что изменение контраста обусловлено изменением химического состава материала, окружающего пластину цементита, а именно, повышенной концентрацией углерода. Вытянутые из цементита дислокациями атомы углерода способны образовывать атмосферы Коттрелла, приводя к изменению контраста.

Наряду с растворением пластическая деформация стали сопровождается фрагментацией пластин цементита. Обнаружено, что в зоне разрушения образцов пластины цементита, сохраняя свою исходную морфологию, разбиваются на области когерентного рассеивания, средние размеры которых составляют 9,3 нм (рис. 5).

Выводы

Методами современного физического материаловедения проведены исследования механических свойств, дефектной субструктуры перлита пластинчатой морфологии и поверхности разрушения рельсовой стали, подвергнутой разрушению в условиях деформации одноос-

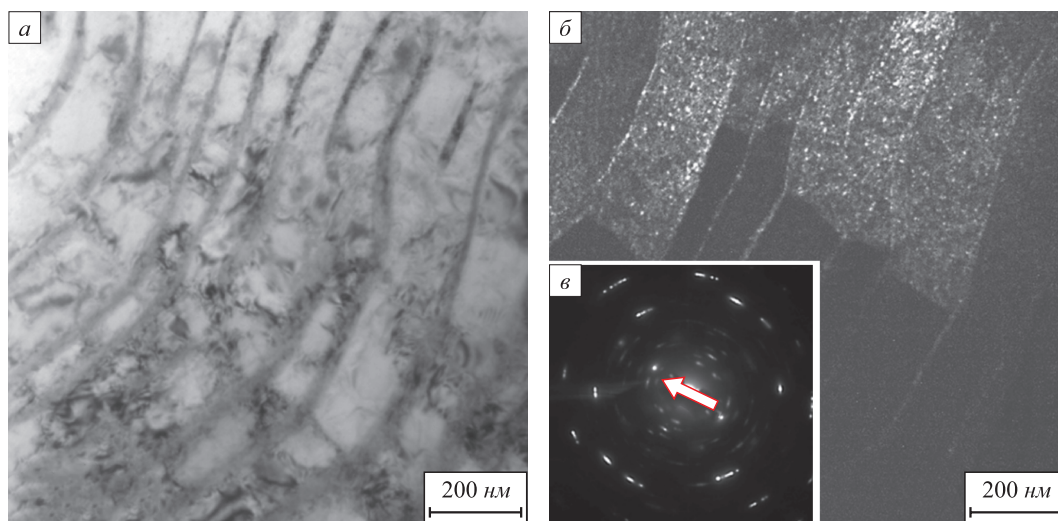


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение наноразмерных частиц цементита, образовавшихся в пластинах феррита рельсовой стали: а – светлое поле; б – темное поле, полученное в рефлекс $[110]\alpha\text{-Fe} + [121]\text{Fe}_3\text{C}$; в – микроэлектроннограмма (стрелкой показан рефлекс, в котором получено темнопольное изображение (б))

Fig. 3. Electron microscopic image of nanoscale cementite particles formed in ferrite plates of rail steel: а – light field; б – dark field obtained in reflex $[110]\alpha\text{-Fe} + [121]\text{Fe}_3\text{C}$; в – microelectron diffraction pattern (arrow indicates the reflex in which the dark-field image is obtained (б))

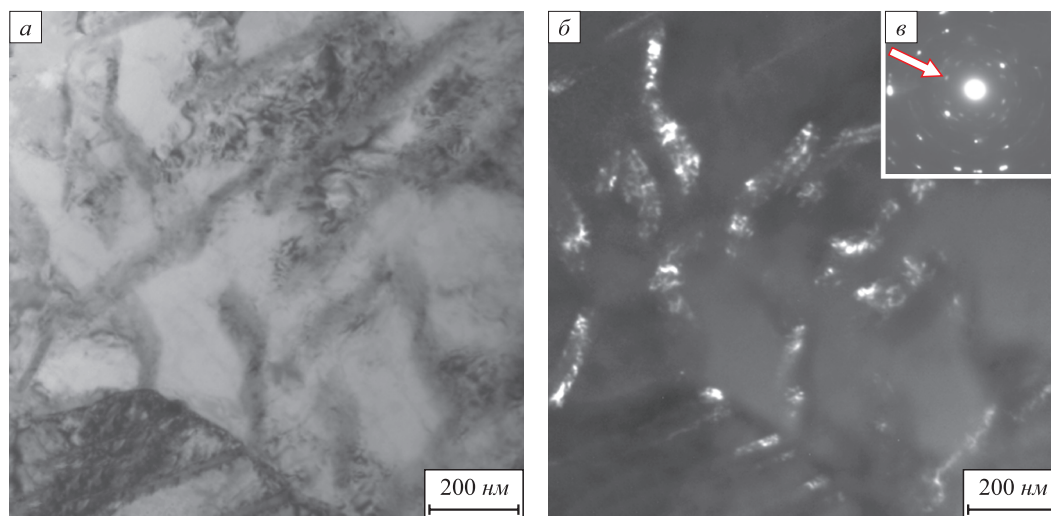


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры рельсовой стали возле пластин цементита: *a* – светлое поле; *б* – темное поле, полученное в рефлексе $[230]\text{Fe}_3\text{C}$; *в* – микроэлектроннограмма (стрелкой показан рефлекс, в котором получено темнопольное изображение (*б*))

Fig. 4. Electron microscopic image of the rail steel structure near cementite plates: *a* – light field; *б* – dark field obtained in reflex $[230]\text{Fe}_3\text{C}$; *в* – microelectron diffraction pattern (arrow indicates the reflex in which the dark-field image is obtained (*б*))

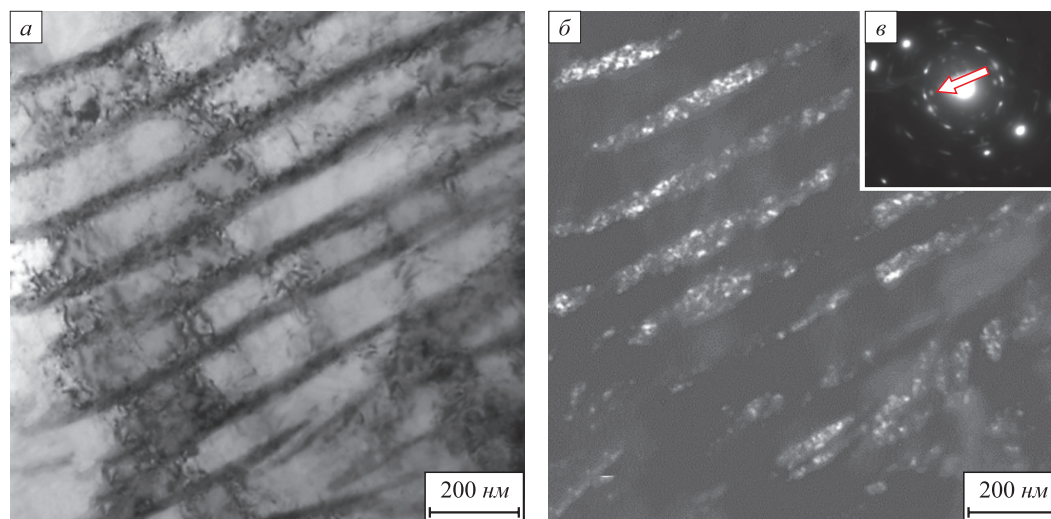


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение фрагментированной структуры цементита: *a* – светлое поле; *б* – темное поле, полученное в рефлексе $[110]\alpha\text{-Fe} + [121]\text{Fe}_3\text{C}$; *в* – микроэлектроннограмма (стрелкой показан рефлекс, в котором получено темнопольное изображение (*б*))

Fig. 5. Electron microscopic image of the fragmented structure of cementite: *a* – light field; *б* – dark field obtained in reflex $[110]\alpha\text{-Fe} + [121]\text{Fe}_3\text{C}$; *в* – microelectron diffraction pattern (the arrow shows the reflex in which the dark-field image is obtained (*б*))

ным растяжением. Установлено, что предел прочности на разрыв изменяется от 1247 до 1335 МПа; деформация образцов при разрушении – от 0,69 до 0,75. Обнаружено формирование трех зон поверхности разрушения: волокнистой, радиальной и зоны среза. Показано, что деформация стали сопровождается разбиением пластин феррита малоугловыми границами на фрагменты и существенным увеличением скалярной плотности дислокаций до $7,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (скалярная плотность дислокаций исходной стали $3,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$). Выявлено раз-

рушение пластин цементита по механизмам разрезания и растворения с последующим выносом углерода движущимися дислокациями в объем пластин феррита с образованием в них наноразмерных (8,3 нм) частиц третичного цементита округлой формы. Обсуждены термодинамические модели разрушения цементита. Показано, что растворение пластин цементита сопровождается их фрагментацией (разделением на области когерентного рассеивания, средние размеры которых 9,3 нм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Конева Н.А., Тришкина Л.И., Козлов Э.В. Физика субструктурного и зернограницного упрочнения. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2014; 11(1): 40–49.
Koneva N.A., Trishkina L.I., Kozlov E.V. Physics of substructural and grain-bound hardening. *Fundamental problems of modern materials science*. 2014; 11(1): 40–49. (In Russ.).
2. Структурно-фазовое состояние и механизмы упрочнения деформированной стали / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Н.А. Попова, С.В. Коновалов, Н.А. Конева. Новокузнецк: Полиграфист; 2016: 510.
Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Popova N.A., Konovalov S.V., Koneva N.A. *Structural-Phase State and Mechanisms of Hardening of Deformed Steel*. Novokuznetsk: Polygraphist; 2016: 510. (In Russ.).
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*. USA: Materials Research Forum LLC; 2021: 190.
4. Эволюция структурно-фазовых состояний металла рельсов при длительной эксплуатации / В.Е. Громов, О.А. Перегудов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, А.А. Юрьев. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2017: 164.
Gromov V.E., Peregudov O.A., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Yur'ev A.A. *Evolution of Structural-Phase States of Metal Rails during Long-Term Operation*. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS; 2017: 164. (In Russ.).
5. Hong M.H., Reynolds W.T., Tarui T., Hono K. Atom probe and transmission electron microscopy investigations of heavily drawn pearlitic steel wire. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1999; 30(3): 717–727.
<https://doi.org/10.1007/s11661-999-1003-y>
6. Hono K., Ohnuma M., Murayama M., Nishida S., Yoshie A., Takahashi T. Cementite decomposition in heavily drawn pearlite steel wire. *Scripta Materialia*. 2001; 44(6): 977–983.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(00\)00690-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(00)00690-4)
7. Taniyama A., Takayama T., Arai M., Hamada T. Structure analysis of ferrite in deformed pearlitic steel by means of X-ray diffraction method with synchrotron radiation. *Scripta Materialia*. 2004; 51(1): 53–58.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.03.018>
8. Goto S., Kirchheim R., Al-Kassab T., Borchers C. Application of cold drawn lamellar microstructure for developing ultra-high strength wires. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2007; 17(6): 1129–1138.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(07\)60238-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(07)60238-6)
9. Borchers C., Al-Kassab T., Goto S., Kirchheim R. Partially amorphous nanocomposite obtained from heavily deformed pearlitic steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2009; 502(1-2): 131–138.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.10.018>
10. Read H.G., Reynolds Jr. W.T., Hono K., Tarui T. APFIM and TEM studies of drawn pearlitic wire. *Scripta Materialia*. 1997; 37(8): 1221–1230.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(97\)00223-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(97)00223-6)
11. Maruyama N., Tarui T., Tashiro H. Atom probe study on the ductility of drawn pearlitic steels. *Scripta Materialia*. 2002; 46(8): 599–603.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00037-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00037-4)
12. Tarui T., Maruyama N., Takahashi J., Nishida S., Tashiro H. Microstructure control and strengthening of high-carbon steel wires. *Nippon Steel Technical Report*. 2005; 91: 56–61.
13. Danoix F., Julien D., Sauvage X., Copreaux J. Direct evidence of cementite dissolution in drawn pearlitic steels observed by tomographic atom probe. *Materials Science and Engineering: A*. 1998; 250(1): 8–13.
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)00529-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)00529-2)
14. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing; 2016: 196.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-39877-8>
15. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer; 2014: 717.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-38934-4>
16. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing; 2016: 518.
17. Фрактография и атлас фрактограмм. Справ. изд. / Пер. с англ.; под ред. Дж. Феллоуза. М.: Металлургия; 1982: 489.
Fractography and Atlas of Fractograms. Reference book. Fellows J. ed. Moscow: Metallurgy; 1982: 489. (In Russ.).
18. Кузнецов Р.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Кормышев В.Е., Шлярова Ю.А., Полевой Е.В., Юрьев А.А. Эволюция структурно-фазовых состояний и свойств дифференцированно закаленных рельсов при экстремально длительной эксплуатации. Сообщение 4. Формирование градиентов структурно-фазового состояния металла головки рельсов по центральной оси после пропущенного тоннажа 1770 млн т брутто. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2021; 3: 37–46.
Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kormyshev V.E., Shlyarova Yu.A., Polevoi E.V., Yur'ev A.A. Evolution of structural-phase states and properties of differentially hardened rails during extremely long-term operation. Message 4. Formation of gradients of the structural-phase state of the metal of the rail head along the central axis after the missed tonnage of 1770 million tons gross. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2021; 3: 37–46. (In Russ.).
19. Перлит в углеродистых сталях / В.М. Счастливцев, Д.А. Мирзаев, И.Л. Яковлева, К.Ю. Окишев, Т.И. Табачникова, Ю.В. Хлебникова. Екатеринбург: УрО РАН; 2006: 312.
Schastlivtsev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L., Okishev K.Yu., Tabatchikova T.I., Khlebnikova Yu.V. *Perlite in Carbon Steels*. Yekaterinburg: UB RAS; 2006: 312. (In Russ.).
20. Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V., Chernyavskii A.G. Plastic distortion as a fundamental mechanism in nonlinear mesomechanics of plastic deformation and fracture. *Physical Mesomechanics*. 2016; 19(3): 255–268.
<https://doi.org/10.1134/S1029959916030048>
21. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе. *Успехи физических наук*. 2012; 182(12): 1351–1357.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201212i.1351>
Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V. Nonlinear wave processes in a deformable solid as in a multiscale hierarchically organized system. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2012; 182(12): 1351–1357. (In Russ.).
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201212i.1351>
22. Григорович К.В., Громов В.Е., Кузнецов Р.В., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. Формирование тонкой струк-

туры перлитной стали при сверхдлительной пластической деформации. Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022; 503(41): 69–72.

<https://doi.org/10.31857/S2686740022020079>

Grigorovich K.V., Gromov V.E., Kuznetsov R.V., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A. Formation of a thin structure of pearlite steel under ultra-long plastic deformation. Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki. 2022; 503(41): 69–72. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31857/S2686740022020079>

23. 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 Materialia. 2011; 59(10): 3965–3977.

<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.03.022>

24. Gavriljuk V.G. Comment on “Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires”. Scripta Materialia. 2001; 45(12): 1469–1472.

[https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)01185-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01185-X)

25. Gavriljuk V.G. Decomposition of cementite in pearlite steel due to plastic deformation. Materials Science and Engineering: A. 2003; 345(1–2): 81–89.

[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00358-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00358-1)

26. Languillaume J., Kapelski G., Baudelet B. Cementite dissolution in heavily cold drawn pearlitic steel wires. Acta Materialia. 1997; 45(3): 1201–1212.

[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(96\)00216-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00216-9)

27. Sauvage X., Copreaux J., Danoix F., Blavette D. Atomic-scale observation and modelling of cementite dissolution in heavily deformed pearlitic steels. Philosophical Magazine A. 2000; 80(4): 781–796.

<https://doi.org/10.1080/01418610008212082>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Крестина Владимировна Аксёнова, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-4908-6776

E-mail: 19krestik91@mail.ru

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт Сильноточной электроники Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0001-8022-7958

E-mail: yufi55@mail.ru

Роман Вадимович Кузнецов, соискатель степени к.т.н. кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: mail@kuzmash.com

Василий Евгеньевич Кормышев, к.т.н., старший научный сотрудник Управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: 89236230000@mail.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Krestina V. Aksenova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-4908-6776

E-mail: 19krestik91@mail.ru

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-8022-7958

E-mail: yufi55@mail.ru

Roman V. Kuznetsov, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

E-mail: mail@kuzmash.com

Vasilii E. Kormyshev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Department of Scientific Researches, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: 89236230000@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

В. Е. Громов – формулирование концепции работы, научное руководство, написание текста статьи.

К. В. Аксёнова – обзор литературы, обсуждение результатов, редактирование текста статьи.

Ю. Ф. Иванов – проведение электронно-микроскопических исследований, анализ результатов.

Р. В. Кузнецов – подготовка текста статьи, обсуждение результатов.

В. Е. Кормышев – подготовка образцов для исследований методом просвечивающей электронной микроскопии, обсуждение результатов.

V. E. Gromov – formulation of the article concept, scientific guidance, writing the text.

K. V. Aksenova – literary review, discussion of the results, editing the text.

Yu. F. Ivanov – conducting electron microscopic studies, analysis of the results.

R. V. Kuznetsov – writing the text, discussion of the results.

V. E. Kormyshev – preparation of the samples for transmission electron microscopic tests, discussion of the results.

Поступила в редакцию 20.04.2022

После доработки 31.10.2022

Принята к публикации 12.12.2022

Received 20.04.2022

Revised 31.10.2022

Accepted 12.12.2022