

Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 1 (135). С. 43–49.

Izvestiya of Altai State University. 2024. No 1 (135). P. 43–49.

Научная статья

УДК 538.9:669.539.382:669.17:625.1

DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-05

Светлой памяти А.М. Глезера посвящается

Физика разрушения и фазового превращения цементита в рельсах при экстремальной эксплуатации

Михаил Анатольевич Порфирьев¹, Наталья Анатольевна Попова²,

Виктор Евгеньевич Громов³, Юлия Андреевна Шлярова⁴,

Олег Александрович Перегудов⁵, Юрий Федорович Иванов⁶

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, mporf372@gmail.com

²Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия, popova-44@mail.ru

³Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, gromov@physics.sibsiu.ru

⁴Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, rubannikova96@mail.ru

⁵Омский государственный технический университет, Омск, Россия, olegomgtu@mail.ru

⁶Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия, yufi55@mail.ru

Original article

Fracture Physics and Phase Transformation of Cementite in Rails under Extreme Operation Conditions

Michael A. Porfiriev¹, Natalia A. Popova², Victor E. Gromov³,

Yulia A. Shliarova⁴, Oleg A. Peregudov⁵, Yurii F. Ivanov⁶

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, mporf372@gmail.com

²Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia, popova-44@mail.ru

³Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, gromov@physics.sibsiu.ru

⁴Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, rubannikova96@mail.ru

⁵Omsk State Technical University, Omsk, Russia, olegomgtu@mail.ru

⁶Institute of High-Current Electronics, SB RAS, Tomsk, Russia, yufi55@mail.ru

На основании электронно-микроскопических исследований и рентгеноспектрального анализа проведена количественная оценка распределения атомов углерода в частицах цементита и элементах дефектной субструктуры на расстояниях до 10 мм от поверхности катания по центральной оси и оси симметрии выкружки дифференцированно закаленных длиномерных 100-метровых рельсов после пропущенного тоннажа 1411 и 1770 млн тонн брутто. Проанализированы три механизма преобразования пластин цементита. Показано, что экстремально длительная эксплуатация рельсов сопровождается существенным перераспределением атомов углерода в поверхностных слоях толщиной до 10 мм.

This paper presents the quantitative estimation of carbon atom distribution in cementite particles and elements of defective substructures within the 10 mm depth area of the running surface of rails along the central axis and the symmetry axis of the upper fillet. The estimation is based on the electron microscopic study and X-ray spectral analysis. The subjects of the study are the differentially hardened 100-meter long rails after passing tonnage of 1411 and 1770 million tons of gross weight. There are three mechanisms of cementite plates transformation analyzed in the paper. It is shown that extremely long operation of rails is accompanied by a significant redistribution of carbon atoms in surface layers with depths up to 10 mm.

В исходном состоянии основное количество атомов углерода сосредоточено в частицах цементита, после экстремально длительной эксплуатации рельсов — также на дефектах кристаллической структуры (дислокации, границы зерен и субзерен), а в поверхностном слое и в кристаллической решетке на основе α -железа. Увеличение пропущенного тоннажа от 1411 до 1770 млн тонн сопровождается более заметным перемещением атомов углерода на дефекты структуры в рабочей выкружке по сравнению с поверхностью катания. При обсуждении результатов использованы представления о бифуркационных межузельных структурных состояниях в зонах поворота кристаллической структуры и механизме пластической дисторсии, а также аналогия экстремально длительной эксплуатации и мегапластической деформации.

Ключевые слова: механизмы разрушения, перлит, пластическая деформация, структура материала

Для цитирования: Порфирьев М.А., Попова Н.А., Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Перегудов О.А., Иванов Ю.Ф. Физика разрушения и фазового превращения цементита в рельсах при экстремальной эксплуатации // Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 1 (135). С. 43–49. DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-05.

Введение

В связи с наметившейся в последние годы тенденцией возрастания скоростей и интенсивности железнодорожного транспорта в разряд актуальных задач выходит создание рельсов с высокими эксплуатационными характеристиками. Решение этой проблемы в России осуществляется с 2013 г. путем производства длинномерных дифференцированно закаленных рельсов. Совершенствование технологии их производства возможно лишь при глубоком анализе механизмов формирования структуры, фазового состава и свойств и их эволюции при длительной эксплуатации.

Установление закономерностей эволюции параметров структурно-фазового состояния при длительной эксплуатации рельсов возможно лишь при применении высокоинформативных методов современного физического материаловедения и в первую очередь просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Полученный с помощью методов ПЭМ банк данных [1–3] позволяет количественно оценить вклады структурных составляющих и дефектной субструктуры в упрочнение рельсов при эксплуатации и проследить за трансформацией цементита.

Установлено [4–6], что длительная эксплуатация рельсов приводит к множественным преобразованиям структуры перлита в поверхностных слоях. Так, на расстоянии 0–10 мм от поверхности катания в головке рельсов кроме пластинчатого перлита присутствуют: разрушенный перлит; вырожденный перлит (ферритокарбидная смесь); зерна перлита, в которых пластины феррита декорированы наноразмерными частицами цементита; зерна феррита с субмикрорекристалличе-

In the initial state, the basic amount of carbon atoms is concentrated in cementite particles. After the extremely long operation period, there are defects in the crystalline structure (dislocations, grain and subgrain boundaries) with the presence of the α -iron in the surface layer and the crystal lattice. An increase of passing tonnage from 1411 to 1770 million tons leads to a distinctive shift of carbon atoms to structural defects of the rail upper fillet. The discussion of the obtained results includes the concepts of bifurcation interstitial structure states in the crystalline structure rotation zones and plastic distortion, along with the analogies of extremely long operation and megaplastic deformations.

Keywords: fracture mechanisms, perlite, plastic deformation, material structure

For citation: Porfiriev M.A., Popova N.A., Gromov V.E., Shliarova Yu.A., Peregudov O.A., Ivanov Yu.F. Fracture Physics and Phase Transformation of Cementite in Rails under Extreme Operation Conditions. *Izvestiya of Altai State University*. 2024. No 1 (135). P. 43–49. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-05.

ской зеренно-субзеренной структурой. Установлено, что, во-первых, преобразования в процессе эксплуатации рельсов структуры перлита пластинчатой морфологии относительно центральной оси протекают существенно меньшими темпами по сравнению с изменением структуры относительно радиуса скругления рабочей выкружки. Во-вторых, зеренно-субзеренная структура формируется исключительно в поверхностном слое металла рельсов. В-третьих, относительное содержание зеренно-субзеренной структуры в поверхностном слое рабочей выкружки в 5 раз выше, чем в поверхностном слое поверхности катания. Указанные факты свидетельствуют о более высоком уровне термомодеформационного преобразования металла рельсов вдоль радиуса рабочей выкружки по сравнению с металлом рельсов вдоль центральной оси.

К настоящему моменту считаются общепризнанными два механизма разрушения пластин цементита для различных видов деформации перлитной стали [2, 3]. Первый заключается в перерезании пластин движущимися дислокациями и выносом ими атомов углерода в феррит. Второй — в вытягивании атомов углерода из решетки карбидной фазы из-за разницы энергии связи атомов углерода с дислокациями (0,6 эВ) и с атомами железа в решетке цементита (0,4 эВ). На заключительном этапе перераспределения атомов углерода отмечено образование наноразмерных частиц цементита, природа происхождения которых дискуссионна [1]. Эти механизмы разрушения пластин цементита в рельсах при эксплуатации подтверждают природу распада цементита при других видах активной и интенсивной пластической (мегапластической) деформации [7–9].

В [10] проведен анализ фазовых превращений в ходе объемной штамповки стали 20Г2Р со степенями деформации 10–50 %; 50–100 % и 100–300 % и представлена интегральная картина эволюции цементита при такой интенсивной пластической деформации. Обнаружено новое явление — рост сферических частиц цементита в области мегапластической деформации. Такое образование и рост наноструктурного цементита является характерной чертой мегапластической деформации [11]. Здесь вполне уместна аналогия с экстремально длительной эксплуатацией рельсов. В [12] показано, что уже при пропущенном тоннаже рельсов 691,8 млн тонн брутто (~4 года эксплуатации рельсов) отмечается значительное перераспределение атомов углерода, оказывающее влияние на свойства металла рельсов.

Целью настоящей работы является установление влияния экстремальных сроков эксплуатации дифференцированию закаленных 100 м рельсов на превращение цементита в головке рельсов и механизмов такого разрушения.

Материал и методы исследования

В качестве материала исследования использованы рельсы категории ДТ350, изъятые из пути

на Экспериментальном кольце РЖД после пропуска 1411 и 1770 млн тонн брутто. Исследования структуры стали проведены методами рентгеноструктурного анализа (рентгеновский дифрактометр XRD-7000S (Shimadzu, Япония)) и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор ЭМ-125) на расстояниях 0, 2, 10 мм от поверхности катания по центральной оси и оси симметрии выкружки. Методики оценки объемной доли карбидной фазы, количества углерода в карбидных частицах и на дефектах описаны в [12].

Результаты и их обсуждение

Из представленной таблицы видно, что процессы эволюции карбидной фазы и перераспределения атомов углерода наиболее интенсивно реализуются в поверхностных слоях до 2 мм. Если в исходном состоянии основное количество атомов углерода было сосредоточено в частицах цементита, то после эксплуатации рельсов местом расположения углерода наряду с частицами цементита являются дефекты кристаллической структуры стали (дислокации, границы зерен и субзерен), а в поверхностном слое стали еще и в кристаллической решетке на основе α -Fe (тоннаж 1411 млн тонн).

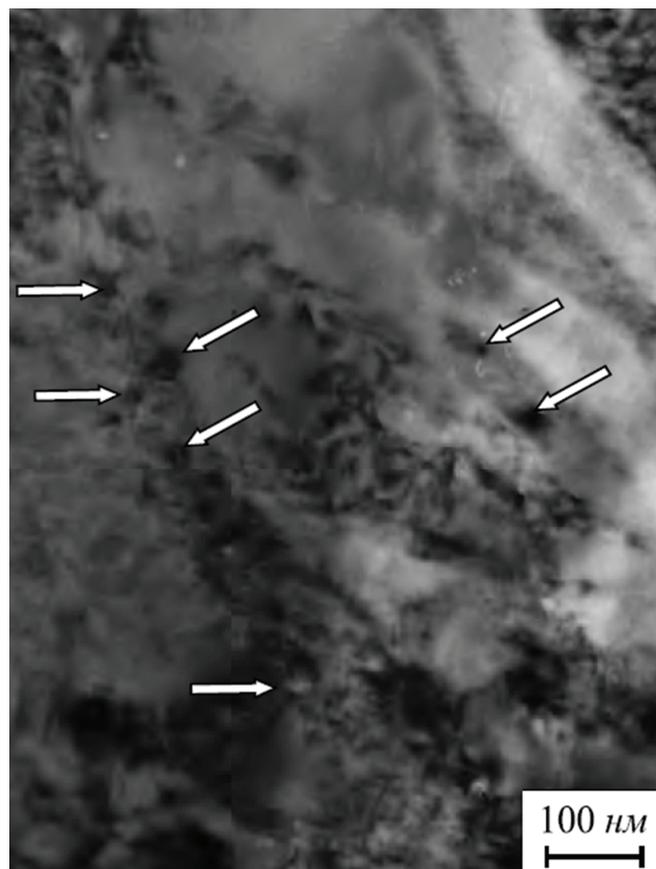
Распределение карбидной фазы и атомов углерода в структуре стали

Структурные элементы	Концентрация углерода, вес. %					
	расстояние до поверхности катания, мм			расстояние до поверхности выкружки, мм		
	0	2	10	0	2	10
Пропущенный тоннаж 1411 млн тонн брутто						
Объемная доля Fe_3C	6,5%	9,2%	11,0%	4,7%	5,4%	10,1%
Частицы цементита	0,50	0,64	0,74	0,34	0,62	0,73
Кристаллическая решетка α -Fe	0,0015	0	0	0,0015	0	0
Дефекты кристаллической структуры	0,24	0,10	0	0,40	0,12	0,01
Пропущенный тоннаж 1770 млн тонн брутто						
Объемная доля Fe_3C	4,5%	8,2%	10,4%	3,1%	3,6%	9,6%
Частицы цементита	0,32	0,57	0,73	0,22	0,25	0,68
Кристаллическая решетка α -Fe	0,0	0	0	0	0	0
Дефекты кристаллической структуры	0,42	0,17	0,01	0,52	0,49	0,06

Выявленная потеря углерода может быть обусловлена как обезуглероживанием поверхностного слоя металла рельсов в процессе сверхдлительной эксплуатации, так и выходом атомов углерода на дефекты структуры стали — линии дислокаций, границы зерен и субзерен, т.е. реализацией процесса динамического старения стали. Взаимодействие дислокаций с атомами внедрения приводит к закреплению дислокаций, препятствующему их дальнейшему движению, приводя в конечном итоге к его охрупчиванию. Факт охрупчивания поверхностного слоя металла проявля-

ется в формировании множественных микро- и макротрещин в головке рельсов. Увеличение пропущенного тоннажа в интервале 1411–1770 млн тонн сопровождается заметным перемещением атомов углерода на дефекты структуры стали в рабочей выкружке по сравнению с поверхностью катания.

Кроме вышеуказанных механизмов разрушения пластин цементита [2–3] в рельсовой стали при исследованных объемах пропущенного тоннажа (и особенно при 1770 млн тонн) обнаружено образование наноразмерных частиц цементита (см. рис.).



ПЭМ изображение наноразмерных частиц Fe₃C (указаны стрелками)

Это можно рассматривать как третий механизм (стадию) перераспределения углерода. Природа появления такого наноразмерного цементита, по-видимому, двоякая. Это вновь образовавшиеся частицы Fe₃C в процессе деформационного распада твердого раствора углерода в решетке α-Fe. Более вероятным выглядит возможный механизм изменения дефектной субструктуры карбида, обусловленный проникновением скользящих дислокаций из решетки α-Fe в решетку Fe₃C. На этой стадии растворения пластин цементита особую роль играют межфазные границы α-фаза — цементит. Когерентная или полукогерентная граница [13] 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 диффузионному массопереносу. Именно поэтому пластины цементита в перлитной колонии разрушаются, а сферические частицы цементита на границах зерен и субзерен сохраняются.

Важным фактором образования наноструктур при мегапластической деформации является протекание фазовых превращений диффузионного типа [11]. Это может свидетельствовать о дополнительных эффективных каналах диссипации упругой энергии (кро-

ме пластической деформации), таких как динамическая рекристаллизация, дисклинационные перестройки и выделение скрытой теплоты деформационного превращения. Диффузионный массоперенос может быть реализован различными механизмами, обсуждаемыми в [9, 13]: диффузией по междоузлиям, по деформационным вакансиям и по ядрам дислокаций.

К числу адекватных механизмов перемещения атомов углерода в условиях интенсивных деформационных воздействий может быть отнесено представление о механизме пластической дисторсии, когда за счет формирования поворотов кристаллической структуры материал способен испытывать значительное формоизменение без нарушения сплошности [14, 15]. В рамках физической мезомеханики такой механизм трактуется как наномасштабные мезоскопические структурные состояния.

В [14, 15] показано, что ротационные моды пластической деформации связаны с формированием локальной кривизны решетки. В этой связи можно полагать, что развитие подобного эффекта в металле рельса делает возможным (облегченным) перемещение атомов углерода. В силу циклического характера приложения нагрузки такой механизм может развиваться обратимо, что позволяет элементам внутренней структуры перестраиваться без образования

несплошностей. Следует особо отметить, что данный процесс не носит диффузионный характер, поскольку развивается в условиях невысоких температур, а нагрузка прикладывается нерегулярно, но циклически. При пропущенном тоннаже 1770 млн тонн в поверхностном слое накапливается критическая плотность дефектов, что сдерживает развитие обратимой упругой деформации и вовлечение (развитие) механизма пластической дисторсии. Формирование подобной «критической» структуры будет завершаться зарождением микротрещин по усталостному механизму и выходу рельсов из строя. По этой причине повышение ресурса работы рельсов может быть достигнуто за счет как можно более длительного сохранения структуры, способной к развитию обратимых деформационных процессов, исключающих разрушение цементитных пластин в перлитных колониях с последующим перемещением атомов углерода на дислокации и области решетки α -Fe.

В [10, 16] обсуждено еще одно возможное место локализации углерода при его переходе в α -Fe. Атомы углерода могут скапливаться в возникающих в ходе пластической деформации микротрещинах, где свободный углерод конденсируется в виде слоев графита. Поскольку эти слои имеют толщину в несколько межатомных расстояний, они не видны на дифракционной картине и поэтому трудны для диагностики. Этот механизм может частично реализовываться и в нашем случае. Вероятность его действия возрастает, когда разрушена часть цементита и атомов углерода больше, чем может локализоваться на дефектах кристаллической решетки. Поскольку электронная микроскопия подтвердила наличие трещин и пор, не исключено, что часть углерода локализована в виде таких слоев в микрополостях различного типа.

Наряду с выше проанализированными механизмами необходимо отметить необходимость дальнейше-

го обсуждения вопросов о движущих силах распада Fe_3C и образования C на дефектах, что связано с невозможностью современными стандартными методами получить надежные данные, позволяющие ответить на эти вопросы. В частности, количество атомов C, локализованных на дефектах, зависит от скалярной плотности дислокаций и плотности субграниц. Обобщая данные, полученные в [1–3, 10, 16, 17] методами внутреннего трения, калориметрии, дилатометрии, рентгеноструктурного анализа, просвечивающей электронной микроскопии, можно считать, что при плотности дислокаций 10^{10} – 10^{11} см⁻² [1] на них может быть локализовано 0,2 % углерода. Это — второй вопрос, требующий обсуждения (места локализации C на дефектах).

Более высокие значения энергии связи атомов углерода свидетельствуют о преимущественных местах локализации в ядрах дислокаций [10]. Однако при этих оценках возникают трудности из-за дефектности самих карбидов, их дисперсности наличия градиентов концентрации углерода на границе карбид — матрица и ряда других причин.

Заключение

На основании результатов ПЭМ и рентгеноструктурного анализа доказано, что экстремально длительная эксплуатация рельсов сопровождается интенсивным разрушением частиц цементита в поверхностных слоях по механизмам разрезания их движущимися дислокациями и вытягивания C из карбида на дислокации и образованием новых наноразмерных частиц. Атомы углерода из кристаллической решетки цементита перемещаются на дислокации, границы зерен и субзерен. На расстоянии от поверхности 2 мм и более атомы углерода в основном сосредоточены в частицах цементита.

Библиографический список

1. Yuriev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation. Millersville, PA: Materials Research Forum LLC, 2021. Vol. 106. 194 p. DOI: 10.21741/9781644901472
2. 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. Vol. 59. No 10. P. 3965–3977. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.03.022
3. Gavriljuk V.G. Decomposition of Cementite in Pearlitic Steel Due to Plastic Deformation // Materials Science and Engineering: A. 2003. Vol. 345. No 1-2. P. 81–89. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00358-1
4. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Кузнецов Р.В., Глезер А.М., Шлярова Ю.А., Перегудов О.А. Деформационное преобразование структуры и фазового состава поверхности рельсов при сверхдлительной эксплуатации // Деформация и разрушение материалов. 2022. № 1. С. 35–39. DOI: 10.31044/1814-4632-2022-1-35-39
5. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Кузнецов Р.В., Шлярова Ю.А., Юрьев А.А., Кормышев В.Е. Структура рельсов после экстремально длительной эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Физика. 2022. Т. 65. № 3. С. 160–165. DOI: 10.17223/00213411/65/3/160
6. Кузнецов Р.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Кормышев В.Е., Шлярова Ю.А., Юрьев А.А. Градиенты структуры, фазового состава и дислокационной субструктуры рельсов при сверхдлительной эксплуатации // Известия Алтай-

ского государственного университета. 2022. № 1. С. 44–50. DOI: 10.14258/izvasu(2022)1-06

7. Tsellermaer V.Ya. Substructural and Phase Transformations During Intense Plastic Deformation of Metals // *Steel in Translation*. 1999. Vol. 29. No 12. P. 75–81.

8. Ivanisenko Yu., Lojkowski W., Fecht H.-J. Stress- and Strain Induced Phase Transformations in Pearlitic Steels // *Materials Science Forum*. 2007. Vol. 539-543. P. 4681–4686. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.539-543.4681

9. Ivanisenko Yu., Lojkowski W., Valiev R.Z., Fecht H.-J. The Mechanism of Formation of Nanostructure and Dissolution of Cementite in a Pearlitic Steel During High Pressure Torsion // *Acta Materialia*. 2003. Vol. 51. No 18. P. 5555–5570. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00419-1

10. Козлов Э.В., Базайкин В.И., Целлермаер В.Я., Иванов Ю.Ф., Игнатенко Л.Н., Попова Н.В., Чинокалов В.Я., Полторацкий Л.М., Закиров Д.М., Громов В.Е. Физика и механика волочения и объемной штамповки. М.: Недра, 1997. 287 с.

11. Глезер А.М., Метлов Л.С. Физика мегапластической (интенсивной) деформации твердых тел // *Физика твердого тела*. 2010. Т. 52. Вып. 6. С. 1090–1097. DOI: 10.1134/S1063783410060089

12. Громов В.Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф., Гришунин В.А., Коновалов С.В. Перераспределение атомов углерода в дифференцированно закаленных рельсах при длительной эксплуатации // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 6. С. 454–459. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-454-459

13. Курдюмов В.Г. Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977. 238 с.

14. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В., Чернявский А.Г. Пластическая дисторсия — фундаментальный механизм в нелинейной мезомеханике пластической деформации и разрушения твердых тел // *Физическая мезомеханика*. 2016. Т. 19. № 1. С. 31–46. DOI: 10.1134/S1029959916010045

15. 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. Т. 182. № 12. С. 1351–1357. DOI: 10.3367/UFN.0182.201212i.1351

16. Гаврилюк В.Г. Распределение углерода в стали. Киев: Наукова думка, 1987. 207 с.

17. Бахарев О.Г., Гаврилюк В.Г., Дегтярев М.В., Левит В.И., Надутов В.М., Свечников В.Л., Чашухина Т.И. Влияние гидроразгрузки на структуру и фазовый состав перлитной стали // *Физика металлов и металловедение*. 1990. № 12. С. 86–90.

References

1. Yuriev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. *Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation*. Millersville, PA: Materials Research Forum LLC, 2021. Vol. 106. 194 p. DOI: 10.21741/9781644901472

2. 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. Vol. 59. No 10. P. 3965–3977. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.03.022

3. Gavriljuk V.G. Decomposition of Cementite in Pearlitic Steel Due to Plastic Deformation. *Materials Science and Engineering: A*. 2003. Vol. 345. No 1-2. P. 81–89. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00358-1

4. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kuznetsov R.V., Glezer A.M., Shliarova Yu.A., Peregudov O.A. Deformation Transformation of Structure and Phase Composition of Rail Surface During Ultra-Long Operation. *Deformation and Destruction of Materials*. 2022. No 1. P. 35–39. DOI: 10.31044/1814-4632-2022-1-35-39. (In Russ.).

5. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kuznetsov R.V., Shlyarova Yu.A., Yurev A.A., Kormyshev V.E. Rail Structure after Extremely Long Operation. *Russian Physics Journal*. 2022. Vol. 65. No 3. P. 160–165. DOI: 10.17223/00213411/65/3/160. (In Russ.).

6. Kuznetsov R.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kormyshev V.E., Shliarova Yu.A., Yuriev A.A. Gradients of Structure, Phase Composition, and Dislocation Substructure of Rails Under the Ultra Long-Term Operation. *Izvestiya of Altai State University*. 2022. No 1. P. 44–50. DOI: 10.14258/izvasu(2022)1-06. (In Russ.).

7. Tsellermaer V.Ya. Substructural and Phase Transformations During Intense Plastic Deformation of Metals. *Steel in Translation*. 1999. Vol. 29. No 12. P. 75–81.

8. Ivanisenko Yu., Lojkowski W., Fecht H.-J. Stress- and Strain Induced Phase Transformations in Pearlitic Steels. *Materials Science Forum*. 2007. Vol. 539-543. P. 4681–4686. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.539-543.4681

9. Ivanisenko Yu., Lojkowski W., Valiev R.Z., Fecht H.-J. The Mechanism of Formation of Nanostructure and Dissolution of Cementite in a Pearlitic Steel During High Pressure Torsion. *Acta Materialia*. 2003. Vol. 51. No 18. P. 5555–5570. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00419-1

10. Kozlov E.V., Bazaikin V.I., Zellermaer V.Ya., Ivanov Yu.F., Ignatenko L.N., Popova N.V., Chinokalov V.Ya., Poltoratskiy L.M., Zakirov D.M., Gromov V.E. *Physics and Mechanics of Drawing and Die Forging*. Moscow: Nedra, 1997. 287 p. (In Russ.).

11. Glezer A.M., Metlov L.S. Physics of Megaplastic (severe) Deformation in Solids. *Physics of the Solid State*. 2010. Vol. 52. No 6. P. 1090–1097. DOI: 10.1134/S1063783410060089 (In Russ.).

12. Gromov V.E., Yur'ev A.A., Ivanov Yu.F., Grishunin V.A., Konovalov S.V. Redistribution of Carbon Atoms in Differentially Charged Rails for Long-Term Operation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018. Vol. 61. No 6. P. 454–459. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-454-459. (In Russ.).

13. Kurdyumov V.G. *Transformations in Iron and Steel*. Moscow: Nauka, 1977. 238 p. (In Russ.).

14. Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V., Chernyavsky A.G. Hall-Petch Analysis for Temperature and Strain Rate Dependent Deformation of Polycrystalline Lead. *Physical*

Mesomechanics. 2016. Vol. 19. No 1. P. 31–46. DOI: 10.1134/S1029959916010045 (In Russ.).

15. 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. Vol. 182. No 12. P. 1351–1357. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201212i.1351. (In Russ.).

16. Gavrilyuk V.G. *Carbon Distribution in Steel*. Kyiv: Naukova Dumka, 1987. 207 p. (In Russ.).

17. Bakharev O.G., Gavrilyuk V.G., Degtyarev M.V., Levit V.I., Nadutov V.M., Svechnikov V.L., Chashchukhina T.I. Influence of Hydrostatic Extrusion on the Structure and Phase Composition of Pearlitic Steel. *The Physics of Metals and Metallography*. 1990. No 12. P. 86–90. (In Russ.).

Информация об авторах

М.А. Порфирьев, соискатель кафедры естественно-научных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия;

Н.А. Попова, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия;

В.Е. Громов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественно-научных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия;

Ю.А. Шлярова, аспирант кафедры естественно-научных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия;

О.А. Перегудов, кандидат технических наук, проректор по молодежной политике и воспитательной деятельности, Омский государственный технический университет, Омск, Россия;

Ю.Ф. Иванов, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия.

Information about the authors

M.A. Porfiriev, Applicant at the Department of Natural Sciences named after. prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia;

N.A. Popova, Candidate of Sciences in Technology, Senior Researcher, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia;

V.E. Gromov, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after. prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia;

Yu.A. Shliarova, Postgraduate Student of the Department of Natural Sciences named after. prof. V.M. Finkel, Researcher, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia;

O.A. Peregudov, Candidate of Sciences in Technology, Vice-Rector for Youth Policy and Educational Activities, Omsk State Technical University, Omsk, Russia;

Yu.F. Ivanov, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia.