

ФИЗИКА

УДК 539.27:669.148

Эволюция структуры пластинчатого перлита рельсовой стали при растяжении*

К.В. Аксенова¹, В.Е. Громов¹, Ю.Ф. Иванов², Е.С. Ващук³, М.А. Порфирьев¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет (Новокузнецк, Россия)

²Институт сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия)

³Филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевске (Прокопьевск, Россия)

Evolution of the Lamellar Pearlite Structure of Rail Steel under Tension

K.V. Aksenova¹, V.E. Gromov¹, Yu.F. Ivanov², E.S. Vaschuk³, M.A. Porfiriev¹

¹Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Russia)

²Institute of High Current Electronics SB RAS (Tomsk, Russia)

³Prokopyevsk Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (Prokopyevsk, Russia)

Методами современного физического материаловедения проведены исследования механических свойств, дефектной субструктуры перлита пластинчатой морфологии и поверхности разрушения рельсовой стали, подвергнутой разрушению в условиях деформации одноосным растяжением. Установлено, что предел прочности на разрыв изменяется от 1247 МПа до 1335 МПа; деформация образцов при разрушении — от 0,22 до 0,26. 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 $3,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$). Показано, что деформация сопровождается формированием внутренних полей напряжений, проявляющихся в виде изгибных контуров экстинкции. Отмечены источники полей напряжений. Выявлено разрушение 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. Показано, что растворение пластин цементита сопровождается их фрагментацией (разделением на области когерентного рассеивания, средние размеры которых 9,3 нм).

Ключевые слова: деформация, одноосное растяжение, эволюция структуры стали, дислокации, цементит, пластинчатый перлит.

DOI: 10.14258/izvasu(2023)1-01

In this paper, the properties of rail steel subjected to fracture under uniaxial tension deformation are studied. Mechanical properties of rail steel, defective substructure of lamellar pearlite, and fracture surface of rail steel are investigated using methods of modern physical materials science.

Tensile strength is found to vary from 1247 to 1335 MPa, and the fracture strain of the samples changes from 0.22 to 0.26. The deformation of the rail steel is accompanied by the process of breaking the ferrite plates into fragments by low angle boundaries along with the significant increase in the scalar dislocation density to $7.9 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (the scalar dislocation density of the original rail steel is $3.2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$). Also, there is a formation of internal stress fields appearing in the form of bend extinction contours. The sources of stress fields are identified. It is revealed that cementite plates are fractured by cutting and dissolution with subsequent transfer of carbon to ferrite plates by moving dislocations and formation of round-shaped nanodimensional (8.3 nm) round shaped particles of tertiary cementite. It is shown that the dissolution of cementite plates is accompanied by fragmentation (into coherent scattering regions with an average size of 9.3 nm).

Key words: deformation, uniaxial tension, evolution of steel structure, dislocations, cementite, lamellar pearlite.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 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).

Введение

В настоящее время в России с ее разветвленной сетью железных дорог протяженностью свыше 125 тыс. км на долю железнодорожного транспорта приходится основной объем грузооборота и пассажирских перевозок. В современных условиях высоких нагрузок на ось и скоростей движения поверхностные слои рельсов при длительной эксплуатации испытывают интенсивные пластические деформации, приводящие к повреждениям и, как следствие, к изъятию рельсов [1, 2]. Как известно, зарождение и развитие микротрещин в пластичных материалах обусловлено эволюцией дефектной субструктуры, которая во многом определяет их механические свойства [3].

Изучение природы и эволюции структурно-фазовых изменений рельсовой стали в процессе эксплуатации представляется возможным на основе анализа деформационного поведения металлов в условиях интенсивной пластической деформации [4–6]. При самых различных видах и режимах пластической деформации в кристаллических материалах с различным типом кристаллической решетки наблюдается фундаментальное явление фрагментации, т.е. деформационное измельчение структуры до 100–200 нм [7, 8].

В исходном состоянии рельсы содержат около 70 % перлита пластинчатой морфологии, деформа-

ция которого сопровождается сложной трансформацией феррита и цементита [9, 10], 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.

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 была использована рельсовая сталь Э76ХФ, свойства и элементный состав которой регламентируются ГОСТом Р 51685–2013 (табл.). Образцы в виде двухсторонних лопаток с размерами рабочей области 1,5x4,45x8,0 мм вырезали из головки 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 производства АО «Евраз-ЗСМК». Деформацию одноосным растяжением плоских пропорциональных образцов осуществляли на испытательной машине Instron 3369 при скорости нагружения 1,2 мм/мин.

Химический состав рельсовой стали

Массовая доля химических элементов, % (остальное Fe)											
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Mo	V	Al
0,73	0,75	0,58	0,012	0,007	0,42	0,07	0,13	0,003	0,006	0,04	0,003

Структуру поверхности разрушения изучали методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Philips SEM 515). Дефектную субструктуру стали в зоне разрушения исследовали методами просвечивающей (метод тонких фольг) электронной дифракционной микроскопии (прибор JEOL JEM-2100) [13–15]. Фольги для просвечивающего электронного микроскопа изготавливали ионным утонением (установка Ion Slicer EM-091001S, утонение осуществляется ионами аргона) пластинок, вырезанных из разрушенных образцов перпендикулярно поверхности разрушения на установке Isomet Low Speed Saw. Методика измерения скалярной и избыточной плотности дислокаций не отличалась от описанной в [1, 2].

Результаты исследования и их обсуждение

Выполненные механические испытания на одноосное растяжение показали, что предел прочности на разрыв изменяется от 1247 МПа до 1335 МПа, а относительная деформация образцов при разрушении составляет 0,22–0,26. В проведенных ранее испытани-

ях на сжатие до $\epsilon=50\%$ [16] образцы стали не удалось разрушить, поскольку они сплющились из-за того, что исследуемая сталь способна достаточно сильно деформироваться.

Изображения поверхности разрушения рельсовой стали приведены на рисунке 1. Как правило, при деформации образцов растяжением на поверхности разрушения формируются три зоны: волокнистая зона (центральная часть образца), следующая за ней радиальная зона и далее, по краю образца, зона среза [1]. Волокнистая зона по форме является эллиптической с большой осью, параллельной длинным сторонам прямоугольника (рис. 1а). Радиальная зона образцов, ширина которых значительно больше толщины, имеет вид шеврона или «елочки» (рис. 1б). 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 направле-

нию к свободной поверхности, формируя шевронные узоры [17]. Вершины V-образных шевронов направлены от очага разрушения. Следовательно, очаг

разрушения в нашем случае расположен на левом краю образца (рис. 1а, б).

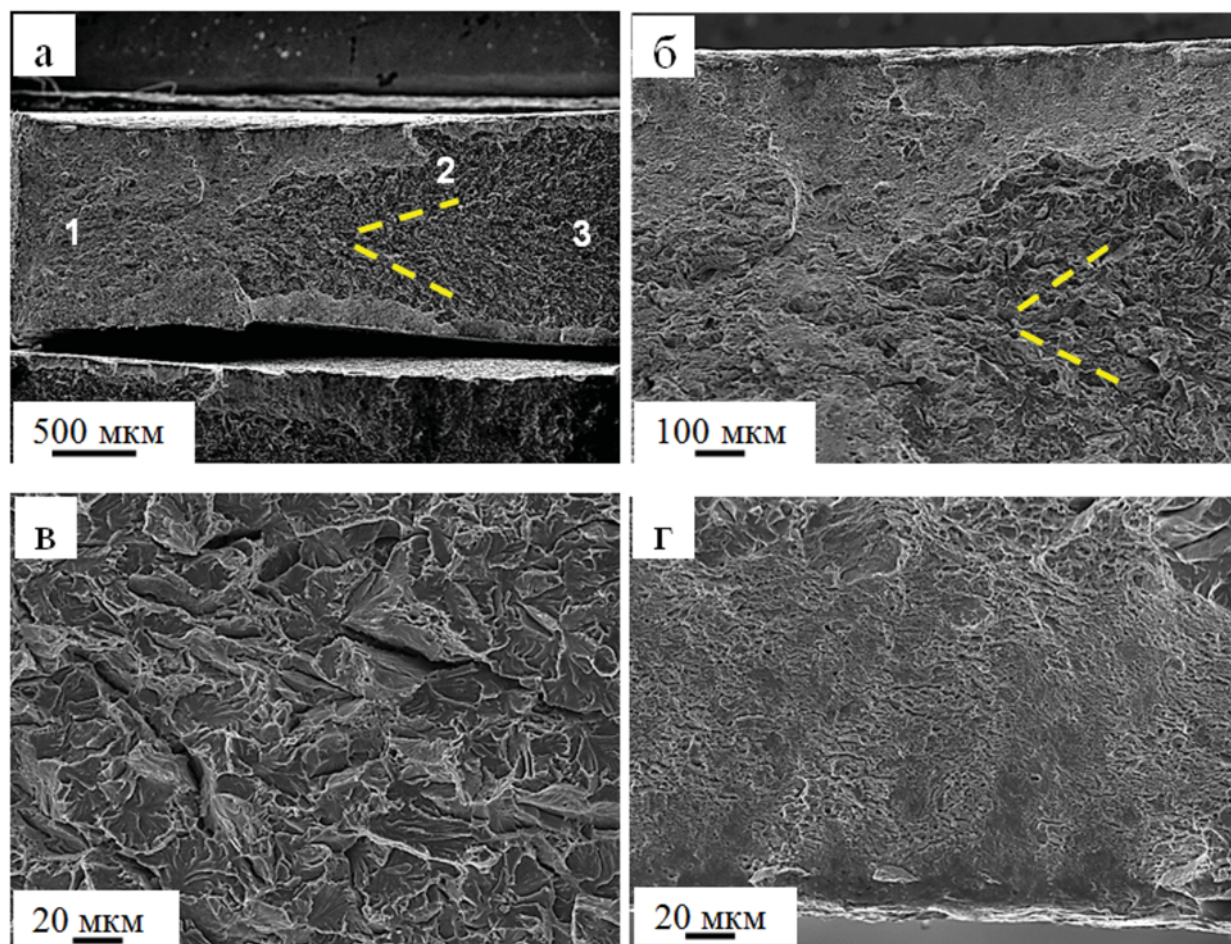


Рис. 1. Фрактография поверхности разрушения рельсовой стали:
1 — зона среза; 2 — радиальная зона; 3 — волокнистая зона

Структура исследуемой стали по морфологическому признаку содержит следующие составляющие: зерна перлита пластинчатой морфологии, зерна феррито-карбидной смеси (зерна вырожденного перлита) и зерна структурно свободного феррита (зерна феррита, в объеме которых нет частиц карбидной фазы), относительное содержание которых в материале 0,7, 0,27 и 0,03 соответственно [2, 18]. 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 в условиях одноосного растяжения плоских образцов стали не приводит к изменению морфологии материала. В зоне разрушения и вдали

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

Во-первых, наблюдается преобразование структуры пластин феррита. Установлено, что пластины феррита перлитных колоний фрагментируются, т.е. разбиваются на области, разделенные малоугловыми границами (рис. 2 а), что наиболее отчетливо проявляется при темнопольном анализе структуры (рис. 2 б). В процессе деформации в объеме пластин феррита формируется дислокационная субструктура в виде скоплений или хаотически распределенных дислокаций. Скалярная плотность дислокаций $7,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В исходном состоянии она составляет $3,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

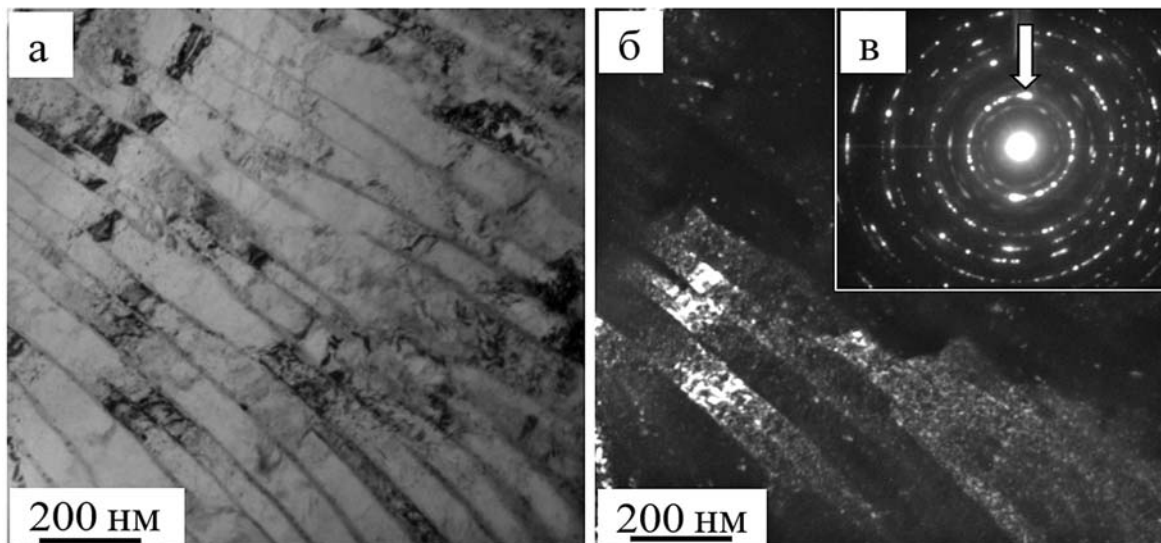


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение фрагментированной структуры феррита; а — светлое поле; б — темное поле, полученное в рефлексе $[110]\alpha\text{-Fe}$; в — микроэлектронограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темнопольное изображение (б)

Во-вторых, 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. В исследуемой стали источниками внутренних полей напряжений являются границы раздела пластин цементита и пластин феррита (рис. 3), а также границы раздела зерен.

Следует отметить, что растяжение исследуемой стали сопровождается вращением зерен перлита, которое наиболее ярко проявляется в зоне разрушения образцов (рис. 3). Последнее позволяет предположить наличие в зоне разрушения образца ротационной моды деформации [20, 21], связанной с формированием локальной кривизны решетки. В связи с этим можно полагать, что развитие подобного эффекта в рельсовой стали делает облегченным перемещение атомов углерода.

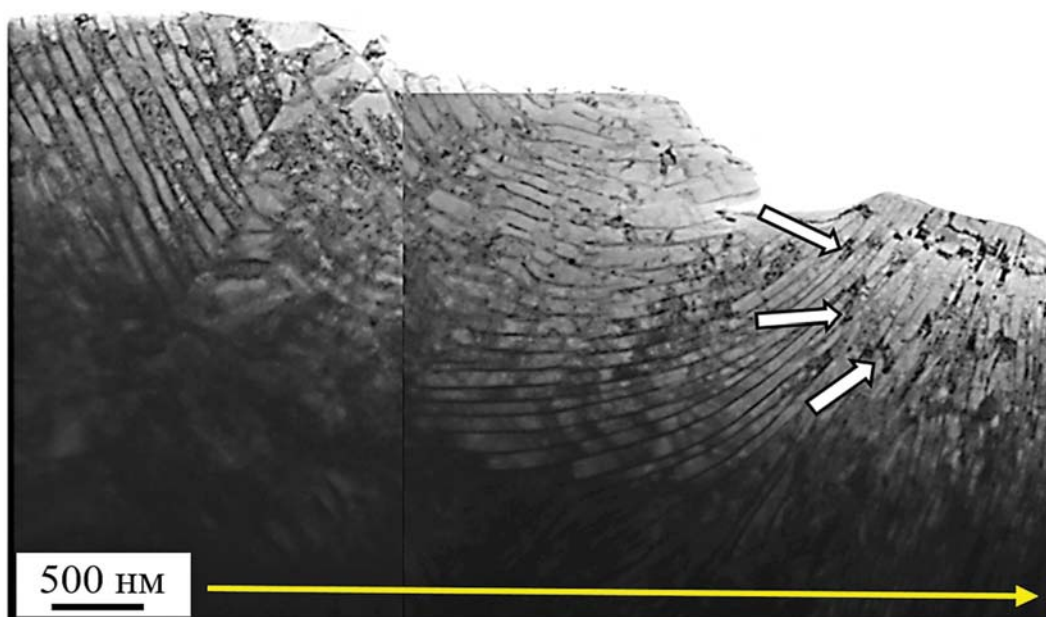


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры зерен перлита в зоне разрушения; стрелками указаны изгибные контуры экстинкции. Длинной стрелкой обозначено направление растяжения образца (продольная ось образца)

В-третьих, деформация исследуемой стали сопровождается разрушением пластин цементита. В научной литературе обсуждаются два возможных механизма разрушения пластин цементита: разрезание и растворение [1, 22]. 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 [22, 23]. Согласно результатам работы [24] увеличение свободной энер-

гии, 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 [25]. Атомы углерода выносятся движущимися дислокациями в объем пластин феррита с последующим формированием наноразмерных ($\sim 8,3$ нм) частиц карбида железа.

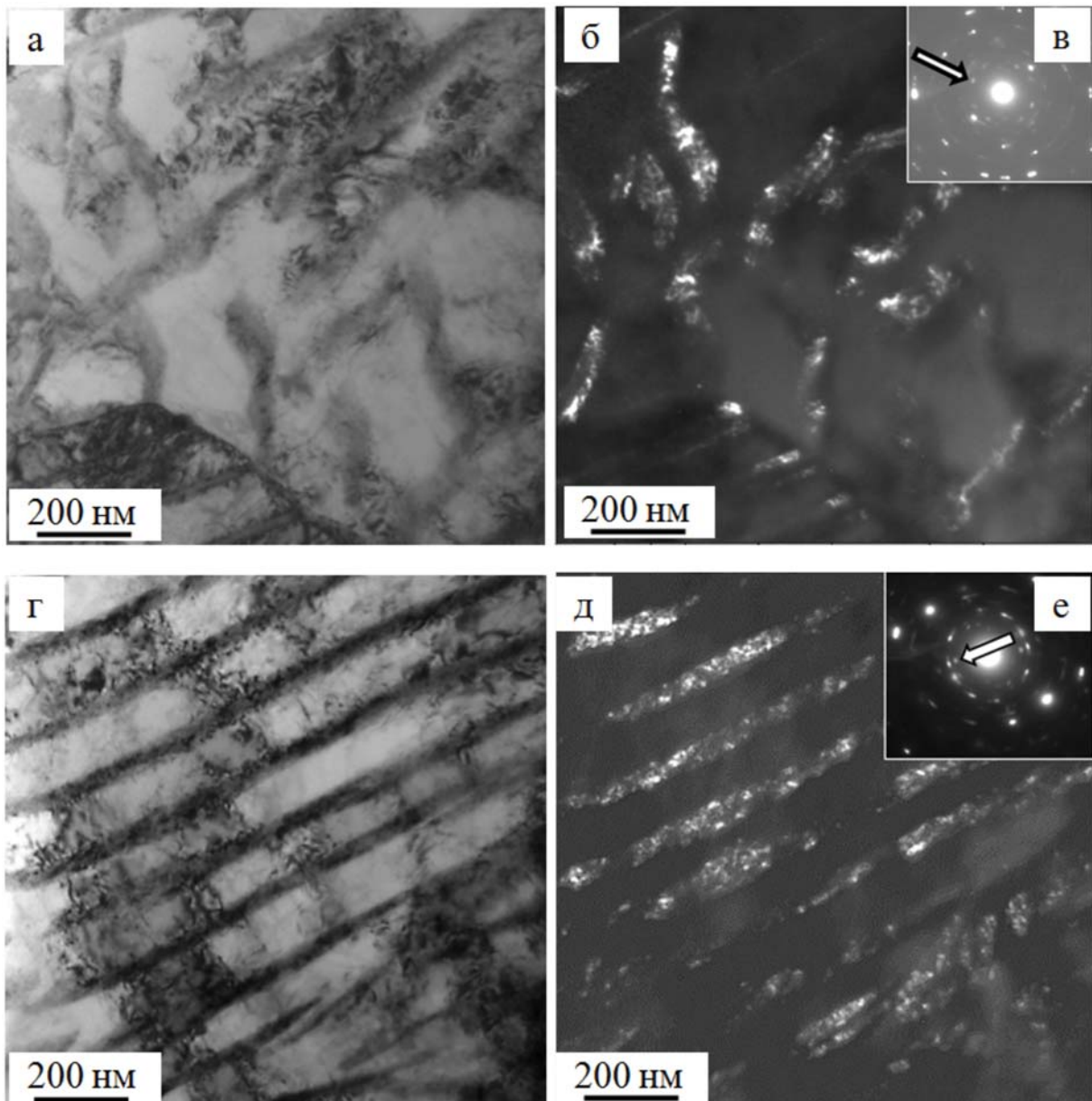


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры рельсовой стали возле пластин цементита: а, г — светлые поля; б — темное поле, полученное в рефлексе $[230]\text{Fe}_3\text{C}$; д — темное поле, полученное в рефлексе $[110]\alpha\text{-Fe} + [121]\text{Fe}_3\text{C}$; в, е — микроэлектронogramмы, стрелками указаны рефлексы, в которых получены темнопольные изображения

Растворение цементита сопровождается формированием вокруг пластин области материала, отличающейся от основного объема зерна контрастом (рис. 4а–в). 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 при пластической деформации стали наблюдается фрагментация пластин цементита (рис. 4г). Обнаружено, что в зоне разрушения образцов пластины цементита, сохраняя свою исходную морфологию, разбиваются на области когерентного рассеивания, средние размеры которых 9,3 нм (рис. 4г–е).

Заключение

Проведены исследования 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 0,22 до 0,26. Выявлено формирование трех зон поверхности разрушения: волокнистой, радиальной и зоны среза. Показано, что деформация рельсовой стали сопровождается разрушением пластин цементита колоний перлита и повторным выделением в объеме пластин феррита наноразмерных частиц третичного цементита размером ~8,3 нм. Обсуждены механизмы разрушения пластин цементита: разрезания и растворения. 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 стали сопровождается формированием в образце внутренних полей напряжений в виде изгибных контуров экстинкции, располагающихся преимущественно в пластинах феррита. Источниками полей напряжений в исследуемой стали являются границы раздела пластин цементита и пластин феррита, а также границы раздела зерен. Выявлена фрагментация пластин феррита и цементита. Средние размеры фрагментов цементита составляют ~9,3 нм.

Выражаем благодарность к.т.н. Е.В. Полевому за предоставленные образцы рельсовой стали и к.т.н. Н.А. Поповой за помощь в обсуждении результатов эксперимента.

Библиографический список

1. Yuriev A.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. Structure and properties of lengthy rails after extreme long-term operation. Millersville, PA, USA: Materials Research Forum LLC, 2021.
2. Громов В.Е., Перегудов О.А., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Юрьев А.А. Эволюция структурно-фазовых состояний металла рельсов при длительной эксплуатации. Новосибирск, 2017.
3. Konieczny J., Labisz K. Structure and properties of the S49 rail after a long term outdoor exposure // *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022. Vol. 16 (2).
4. Wang Y., Tomota Y., Harjo S., Gong W., Ohmura T. In-situ neutron diffraction during tension-compression cyclic deformation of a pearlite steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 676.
5. Pan R., Ren R., Chen C., Zhao X. Formation of nanocrystalline structure in pearlitic steels by dry sliding wear // *Materials Characterization*. 2017. Vol. 132.
6. Kapp M.W., Hohenwarter A., Wurster S., Yang B., Pippan R. Anisotropic deformation characteristics of an ultrafine- and nanolamellar pearlitic steel // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 106.
7. Raabe D., Kumar R. Tensile deformation characteristics of bulk ultrafine-grained austenitic stainless steel produced by thermal cycling // *Scripta Materialia*. 2012. Vol. 66.
8. Skakov M.K., Uazyrkhanova G.K., Popova N.A., Scheffler M. Influence of heat treatment and deformation on the phase-structural state of steel 30CrMnSiA // *Key Engineering Materials*. 2013. Vol. 531–532.
9. Ivanisenko Y., Kulagin R., Fedorov V., Mazilkin A., Scherer T., Baretzky B., Hahn H. High Pressure Torsion Extrusion as a new severe plastic deformation process // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 664.
10. 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. 608.
11. Ning Jiang-li, Courtois-Manara E., Kurmanaeva L., Ganeev A.V., Valiev R.Z., Kübel C., Ivanisenko Yu. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 581.
12. 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.
13. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016.
14. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York : Springer, 2014.

15. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin : Springer International Publishing, 2016.
16. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Аксенова К.В., Кузнецов Р.В., Кормышев В.Е., Ващук Е.С. Эволюция структуры рельсовой стали при сжатии // *Деформация и разрушение материалов*. 2022. № 8.
17. Фрактография и атлас фрактограмм : справ. изд. / Пер с англ. ; Под ред. Дж. Феллоуза. М., 1982.
18. Конева Н.А., Тришкина Л.И., Козлов Э.В. Физика субструктурного и зернограничного упрочнения // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2014. Т. 11. № 1.
19. Счастливец В.М., Мирзаев А.А., Яковлева И.Л., Окишев К.Ю., Табатчикова Т.И., Хлебникова Ю.В. Перлит в углеродистых сталях. Екатеринбург, 2006.
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. Vol. 19. № 3.
21. Григорович К.В., Громов В.Е., Кузнецов Р.В., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. Формирование тонкой структуры перлитной стали при сверхдлительной пластической деформации // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. 2022. Т. 503.
22. 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.
23. Gavriljuk V.G. Decomposition of cementite in pearlite steel due to plastic deformation // *Materials Science and Engineering: A*. 2003. Vol. 345.
24. Languillaume J., Kapelski G., Baudelet B. Cementite Dissolution in Heavily Cold Drawn Pearlitic Steel Wires // *Acta Materialia*. 1997. Vol. 45. № 3.
25. 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. Vol. 80.