

ТЕХНИЧЕСКИЕ
НАУКИ

УДК 669.539.392:669.17:625.1

РОЛЬ КРИВИЗНЫ РЕШЕТКИ В ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА РЕЛЬСОВ
ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2020 г. Академик РАН В. Е. Панин¹, В. Е. Громов^{2,*}, Ю. Ф. Иванов³,
А. А. Юрьев⁴, В. Е. Кормышев²

Поступило 17.07.2020 г.

После доработки 17.07.2020 г.

Принято к публикации 20.07.2020 г.

Проведен анализ эволюции/деградации структуры и фазового состава материала головки 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов после экстремально длительной эксплуатации. Показано, что подобные условия нагружения приводят к различным структурным трансформациям на поверхности головки рельсов. Образование кривизны решетки в междоузлиях кристалла и возникновение там высокоподвижных межузельных структурных состояний обуславливает растворение перлита. Оно происходит на глубину ≈ 10 мм. В поверхности катания в слое ≈ 2 мм на него накладывается образование наномасштабной субструктуры, на границах которой выделяются наночастицы карбидной фазы. Разрушение металла рельсов в первую очередь будет протекать в поверхностном слое выкружки, где формируется критический уровень кривизны кристаллической решетки и максимальна концентрация межузельных вакансий.

Ключевые слова: рельсы дифференцированно закаленные, экстремально длительная эксплуатация, эволюция/деградация фазового состава и структуры, кривизна кристаллической решетки

DOI: 10.31857/S2686740020050144

Проблема поведения рельсов при длительной эксплуатации и анализ причин их выхода из строя вызывает большой интерес [1]. Фундаментальные исследования механизмов постепенной деградации структуры в деформируемом материале [2] позволят решить практически значимую проблему повышения надежности рельсов в условиях непрерывного повышения нагрузок на ось и скоростей движения.

Одним из ключевых путей формирования высоких эксплуатационных свойств является установление закономерностей структурно-фазовых трансформаций при длительной эксплуатации рельсов в рамках представлений о кривизне кристаллической решетки [2–4].

Возникновение контактных давлений в металле головки рельсов уже при сравнительно небольшом пропущенном тоннаже вызывает значительные необратимые изменения. Они касаются поверхностных слоев, где наблюдаются существенное изменение структуры, аномально высокие значения микротвердости, явления растворения цементита и пр. Это может являться причиной выхода рельсов из строя [5–9].

Выполненные ранее исследования [1, 8–11] убедительно показали, что разрушение металла рельсов инициируется именно в поверхностном слое. Целью настоящей работы является анализ механизмов деградации структуры и фазового состава металла головки рельсов после экстремально длительной эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования использованы 100-метровые дифференцированно закаленные рельсы категории ДТ350, изъятые из пути на Экспериментальном кольце РЖД в Щербинке после пропущенного тоннажа 1411 млн тонн брутто. По химическому составу металл пробы удовлетворял требованиям технических условий для стали марки Э76ХФ (С: 0.71–0.82; Si: 0.25–0.60;

¹ Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

² Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

³ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

⁴ АО «ЕВРАЗ – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», Новокузнецк, Россия

*E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

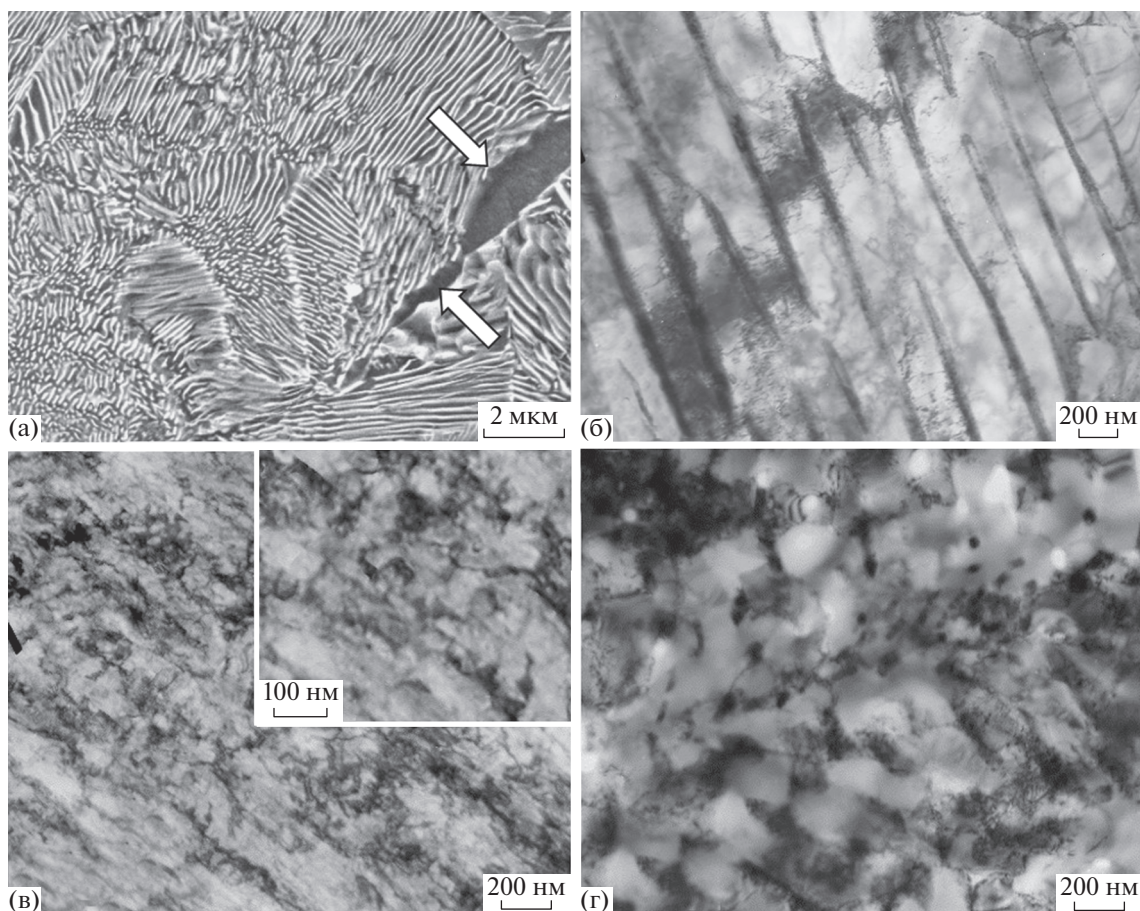


Рис. 1. Структура металла рельсов в исходном состоянии (а, б) и после длительной эксплуатации (в, г); в – поверхностный слой рабочей выкружки; г – поверхностный слой поверхности катания; а – сканирующая, б–г – просвечивающая электронная микроскопия.

Mn: 0.75–1.25; Cr: 0.2–0.8; V: 0.03–0.15; Fe – основа). Исследования структуры и фазового состава металла рельсов на различных расстояниях от поверхности катания осуществляли методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дифференцированная закалка рельсов сжатым воздухом приводит к формированию поликристаллической структуры, представленной зернами перлита (пластинчатой и глобулярной морфологии, рис. 1а, 1б) и малым количеством зерен феррита (до 5% структуры стали, указаны стрелками). Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии показали, что пластическая деформация металла, имеющая место при эксплуатации рельсов, сопровождается существенной трансформацией структуры перлита. Выявлены два механизма.

Первый механизм сопровождается преимущественно изменением их линейных размеров и морфологии. После наработки 1411 млн тонн грунто разрушение пластин цементита перлитных колоний развивается в поверхностном слое на глубине до ≈ 10 мм. Второй механизм проявляется в уходе атомов углерода из кристаллической решетки цементита с последующим выделением наноразмерных частиц карбидной фазы на субграницах. Данный механизм разрушения цементита характерен для поверхностного слоя толщиной до ≈ 2 мм.

Установлено, что в наибольшей степени подобная деградация структуры наблюдается в поверхностном слое металла головки рельсов. В объеме растворенного перлита формируется субмикро- и нанокристаллическая структура легированного α -железа (ОЦК-кристаллическая решетка) (рис. 1в, 1г). По границам субзерен располагаются частицы карбидной фазы. В поверхностном слое рабочей выкружки размеры субзерен изменяются в пределах 30–40 нм (рис. 1в), в то

время как в поверхностном слое поверхности ката-ния — 150–300 нм (рис. 1г). Относительное содержание субзеренной структуры в поверхностном слое рабочей выкружки составляет 25%; в поверхностном слое поверхности ката-ния — 15%.

В литературе показано [12], что возникнове-ние при пластической деформации кривизны ре-шетки сопровождается образованием зон генера-ции высокоподвижных наноструктурных дефек-тов, энергия миграции которых составляет всего 0.15 эВ. При создании кривизны решетки в низ-колегированной стали в [13] наблюдали смеще-ние низкоэнергетических электронов в междууз-лия, чтобы заэкранировать там наноструктурные дефекты. В условиях создания во всем объеме сплава Ti-6Al-4V кривизны решетки, в [2] при ударном изгибе при $T = -70^{\circ}\text{C}$ на поверхности разрушения наблюдали вязкое выдавливание по-токов наномасштабных дефектов. При лазерной сварке низколегированной стали исключается образование хрупких карбидов, если предвари-тельно в стали создать кривизну решетки [14]. Кривизна решетки является основой анализа пластичности твердых тел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительная эксплуатация рельсов сопровож-дается деградацией структуры колоний пластин-чатого перлита по двум механизмам. Основным из них является растворение перлита высокопо-движными межузельными вакансиями в зонах кривизны решетки в слое толщиной ≈ 10 мм. На него накладывается вязкое разрушение в слое толщиной ≈ 2 мм, где формируется нанокристал-лическая субзеренная структура с выделениями наночастиц карбидной фазы. Разрушение метал-ла рельсов будет протекать в поверхностном слое выкружки, где формируется критический уро-вень кривизны кристаллической решетки с обра-зованием высокой концентрации межузельных вакансий.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Анализ структурно-фазового состояния стали вы-полнен при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 19–32–60001), анализ механизмов разруше-ния перлита выполнен при финансовой поддержке гранта РНФ (проект 19–19–00183).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов В.Е., Перегудов О.А., Иванов Ю.Ф. и др. Эволюция структурно-фазовых состояний металла рельсов при длительной эксплуатации. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017.
2. Панин В.Е., Панин А.В., Первалова О.Б. и др. Влия-ние кривизны кристаллической решетки на иерар-хию масштабов деформационных дефектов и ха-рактер пластического течения металлических мате-риалов // Физ. мезомех. 2020. Т. 23. № 4. С. 5–10.
3. Panin V.E., Derevyagina L.S., Panin S.V., et al. The Role of Nanoscale Strain-Induced Defects in the Sharp In-crease of Low-Temperature Toughness in Low-Carbon and Low-Alloy Steels // Mater. Sci. Eng. A. 2019. V. 768. P. 138491.
4. Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V., et al. Plastic Distortion as a Fundamental Mechanism in Nonlinear Mesomechanics of Plastic Deformation and Fracture // Phys. Mesomech. 2016. V. 19. № 3. P. 255–268.
5. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure Modification in the Surface Layers of Railway Rails and Wheels // Steel tech. 2008. V. 3. № 1. P. 19–23.
6. Ivanisenko Yu., Maclaren I., Souvage X., et al. Shear-Induced $\alpha \rightarrow \gamma$ Transformation in Nanoscale Fe–C Composite // Acta Mater. 2006. V. 54. P. 1659–1669.
7. Seo J.-W., Jun H.-K., Kwon S.-J., et al. Rolling Contact Fatigue and Wear of Two Different Rail Steels under Rolling–Sliding Contact // Intern. J. Fatigue. 2016. V. 83. P. 184–194.
8. Lewis R., Christoforou P., Wang W.J., et al. Investigation of the Influence of Rail Hardness on the Wear of Rail and Wheel Materials under Dry Conditions (ICRI wear mapping project) // Wear. 2019. V. 430–431. P. 383–392.
9. Skrypnyk R., Ekh M., Nielsen J.C.O., et al. Prediction of Plastic Deformation and Wear in Railway Crossings – Comparing the Performance of Two Rail Steel Grades // Wear. 2019. V. 428–429. P. 302–314.
10. Kim D., Quagliato L., Park D., et al. Lifetime Prediction of Linear Slide Rails Based on Surface Abrasion and Rolling Contact Fatigue-Induced Damage // Wear. 2019. V. 420–421. P. 184–194.
11. Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., et al. Struc-tural Phase States and Properties of Rails after Long-Term Operation // Materials Letters. 2020. V. 268. P. 127499.
12. Matsukawa Y., Zinkle S.J. One-Dimensional Fast Mi-gration of Vacancy Clusters in Metals // Science. 2007. V. 318. P. 959–962.
13. Панин В.Е., Шуленов И.А., Деревягина Л.С. и др. Со-здание наномасштабных мезоскопических струк-турных состояний для образования мартенситных фаз в низколегированной стали с целью получения высокой низкотемпературной ударной вязкости // Физ. мезомех. 2019. Т. 22. № 6. С. 5–13.
14. Derevyagina L.S., Gordienko A.I., Orishich A.M., et al. Microstructure of Inter-critical Heat Affected Zone and Toughness of Microalloyed Steel Laser Welds // Mater. Sci. Eng. A. 2020. V. 770. № 7. P. 138522. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138522>

ROLE OF LATTICE CURVATURE IN STRUCTURAL DEGRADATION OF RAIL METAL SURFACE LAYER IN LONG-TERM OPERATION

Academician of the RAS V. E. Panin^a, V. E. Gromov^b, Yu. F. Ivanov^c,
A. A. Yuriev^d, and V. E. Kormyshev^b

^a *Institute of Strength Physics and Material Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

^b *Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation*

^c *Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

^d *JSC 'EVRAZ – West-Siberian Metallurgical Combine', Novokuznetsk, Russian Federation*

Evolution/degradation of structure and phase composition of rail head material of 100-meter differentially quenched rails after extremely long-term operation is analyzed. It is shown that the similar conditions of loading result in different structural transformation on rail head surface. The formation of lattice curvature in crystal interstitial sites and initiation of highly mobile interstitial structural states there cause a dissolution of pearlite. It occurs at a depth of ≈ 10 mm. It is superimposed by the formation of nanoscale substructure in tread surface in the layer ≈ 2 mm thick. The nanoparticles of carbide phase precipitate on the boundaries of the substructure. The failure of rail metal will proceed, in the first place, in fillet surface layer where critical level of crystal lattice curvature is formed and the concentration of interstitial vacancies is maximum.

Keywords: differentially quenched rails, extremely long-term operation, evolution/degradation of phase composition and structure, crystal lattice curvature