

01,07

Анализ усталостного разрушения рельсовой стали

© С.А. Атрошенко¹, С.С. Майер², В.И. Смирнов²

¹ Институт проблем машиноведения РАН,
Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский государственный университет Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: satroshe@mail.ru

Поступила в Редакцию 21 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 21 апреля 2020 г.

Принята к публикации 29 мая 2020 г.

Проведено исследование взаимосвязи между механическими свойствами материала в микрообъемах и свойствами материала, находящегося под нагрузкой. Приведен фрактографический анализ поверхности усталостного излома железнодорожного рельса с внутренней поперечной трещиной. Обсуждается связь фрактографических особенностей со структурой материала. Образец с внутренней поперечной трещиной в головке рельса изъят из эксплуатации после интенсивной циклической нагрузки в стрелочном переводе. Для металлографического исследования образец был подвергнут изгибу по трехточечной схеме. На поверхности излома рельса выявлено три области, различающиеся по характеру разрушения материала.

Ключевые слова: рельс, поперечная трещина, излом, усталостное разрушение.

DOI: 10.21883/FTT.2020.10.49898.094

1. Введение

В связи с увеличением объема грузоперевозок и пассажиров и интенсивностью движения возрастает опасность выхода рельсов из строя, поэтому анализ разрушения деформационных изменений структуры рельсов после длительной эксплуатации является актуальным. Термомеханическое повреждение [1] возникает при скольжении колес по рельсу, когда рельс подвергается многочисленным циклическим нагрузкам, а при увеличении количества циклов увеличивается величина микронапряжений [2]. В результате происходит нагрев поверхности рельса до высокой температуры и охлаждение, что приводит к изменению микроструктуры и появлению микротрещин, которые являются причиной зарождения поперечных усталостных трещин. Началом образования дефекта является возникновение внутренней продольной трещины от поверхности рельса. Развитие продольной трещины приводит к образованию поперечной трещины [3–5]. При малых размерах и большой глубине залегания такие трещины не обнаруживаются дефектоскопами. При планировании работы дефектоскопных средств важно знать, как быстро развивается поперечная трещина под нагрузкой, а также как она распространяется в зависимости от площади поверхности. Для установления причины излома рельса был вырезан образец длиной 1.2 м с трещиной посередине. Далее образец был подвергнут изгибу по трехточечной схеме головкой вниз до его разделения на части. На поверхности излома проводилось фрактографическое исследование. После этого был вырезан шлиф толщиной примерно 1.5 см для металлографического исследования структуры поперечного сечения образца.

2. Материал и методика исследования

Проведено исследование разрушенного стального рельса, работавшего при переключении стрелки. В качестве материала исследования использовали образцы рельсовой стали Р65, свойства и элементный состав которой регламентируются ГОСТ Р 51685–2013. Доля вязкой составляющей в изломе стали определялась по ASTM E 436-03. Исследование поверхности разрушения проводилось на микроскопе Axio Observer Z1-M в темном поле при увеличении $100\times$, а микроструктура поперечного сечения анализировалась в светлом поле на том же микроскопе и сканирующем микроскопе марки Phenom. Микротвердость измерялась на приборе SHIMADZU марки HNV-G. Микроанализ отдельных областей проводился с помощью сканирующего микроскопа марки Phenom.

3. Результаты и обсуждение

Общий вид поверхности разрушения представлен на рис. 1. Как видно из рис. 1, на поверхности разрушения выделяются три зоны. Фрактуры трех зон представлены на рис. 2, а доля вязкой составляющей в изломе этих трех зон разрушения представлена в табл. 1.

Как видно из представленных данных, наиболее хрупкое разрушение наблюдается в первой зоне — это последний этап разрушения рельса, начинается оно в третьей зоне, распространяется во вторую и заканчивается в первой, где кроме приложенных нагрузок наблюдается и воздействие температуры [6]. В табл. 2 представлена микротвердость зон разрушения. Наибольшая твердость оказалась в средней самой протяженной

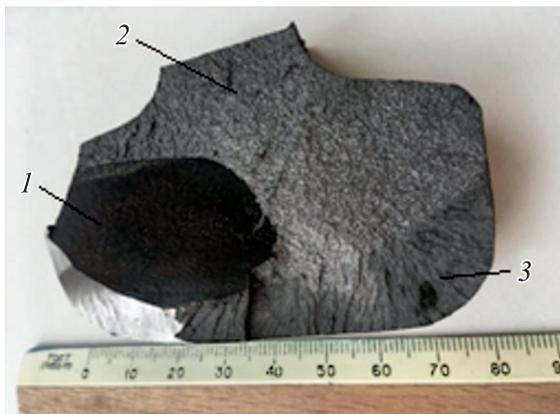


Рис. 1. Вид поверхности разрушения рельса после работы в стрелочном переводе.

зоне разрушения, а самая низкая — в заключительной, где уже произошло разделение образца на части.

Анализ микроструктуры поперечных шлифов стали в трех зонах разрушения

Область 1. Конечный этап разрушения. В этой области у поверхности разрушения структура

Таблица 1. Доля вязкой составляющей в изломе рельсовой стали

Область разрушения	Доля волокна в изломе, %
1	96.8
2	97.4
3	99.4

Таблица 2. Микротвердость рельсовой стали в трех зонах разрушения

Зона	HV _{average} , МПа	Разброс HV	Отклонение, %
1	315.1	300–340	5.7
2	333.3	319–340	2.5
3	315.5	311–322	1.3

имеет характер течения, где все структурные составляющие смешались (рис. 3, *a*), а также присутствует разветвленная сетка микротрещин (рис. 3, *b, c*).

В центре этой области (рис. 4, *a, b*) наблюдается типичная для этой стали структура пластинчатого перлита, а также области динамической рекристаллизации (рис. 4, *b, c, d*), часто наблюдающиеся при динамическом

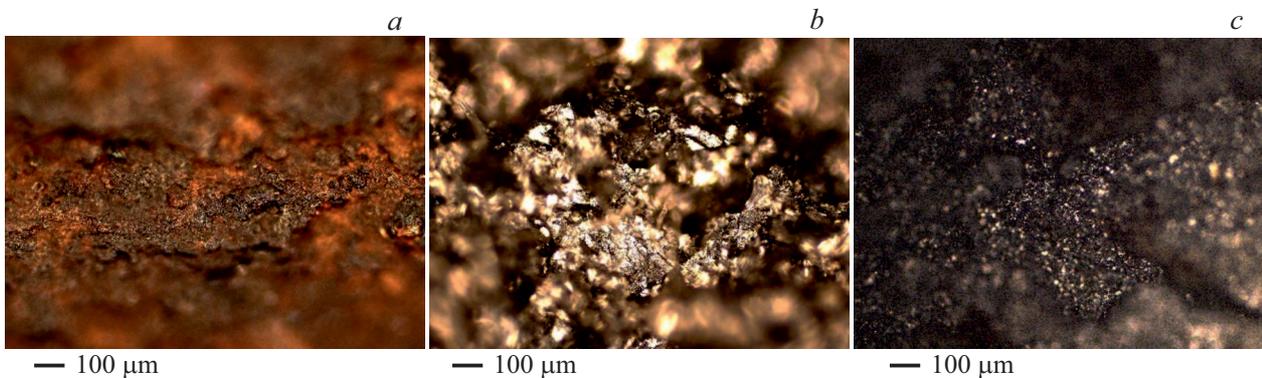


Рис. 2. Фрактура зон разрушения: *a* — 1, *b* — 2, *c* — 3.

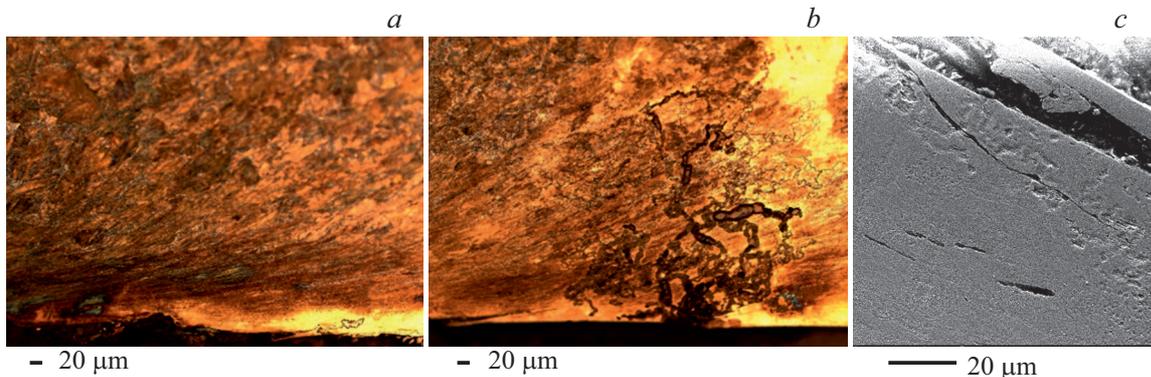


Рис. 3. Микроструктура у поверхности разрушения области 1.

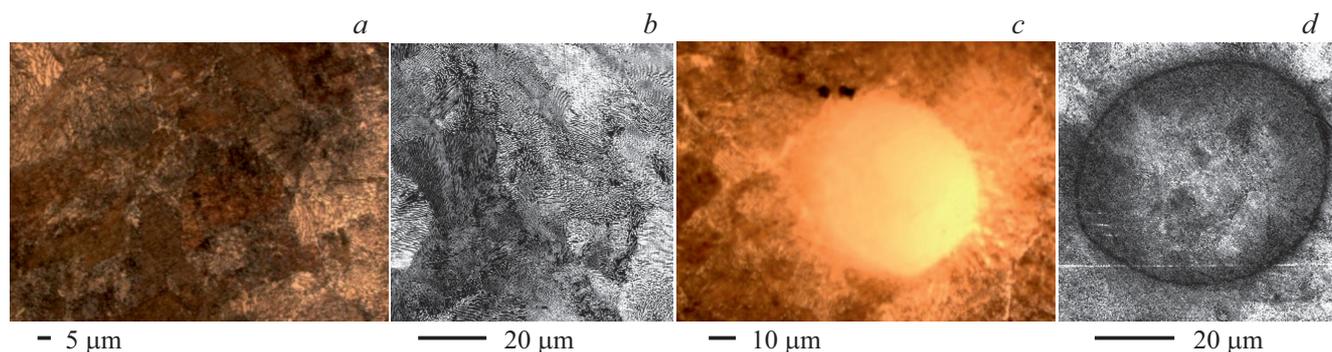


Рис. 4. Микроструктура в центре области 1.

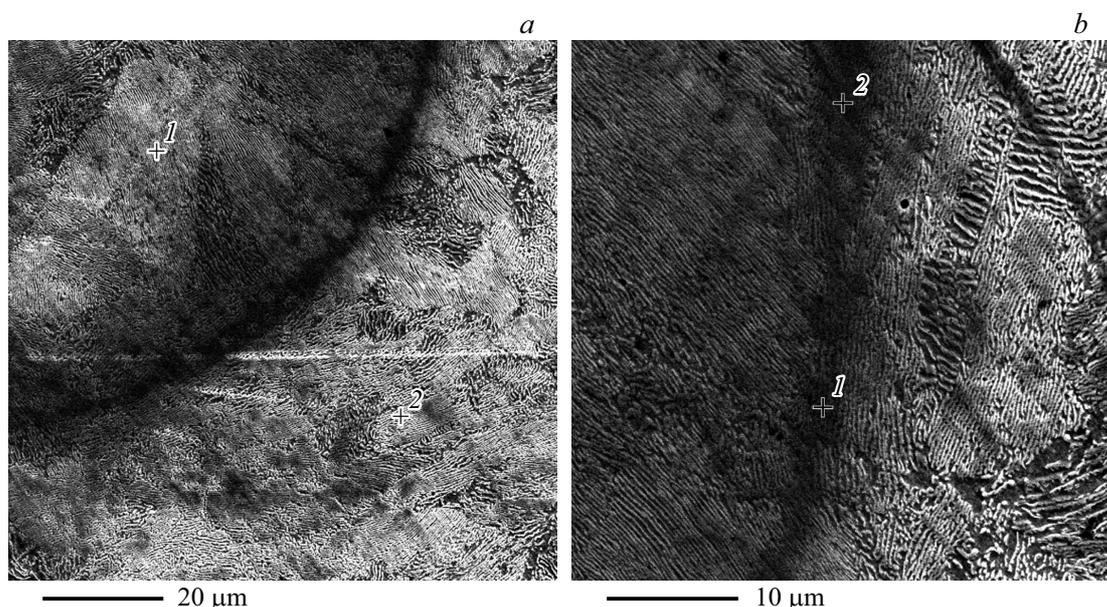


Рис. 5. Зона рекристаллизации.

нагрузении [7]. В результате нагрева и быстрого охлаждения в этих областях динамической рекристаллизации наблюдается микрокристаллическая структура вплоть до наноструктуры. В некоторых участках этих областей зерно уже выросло до $4\ \mu\text{m}$.

В результате сильного нагрева в некоторых областях произошел отжиг, и пластинчатый цементит превратился в глобулярный, а иногда он растворяется аналогично данным работы [8]. Если в третьей области, с которой начиналось зарождение трещины и разрушение, размер зерна и структурных составляющих — цементита и феррита был мельче (табл. 3), то во второй области эти значения увеличились, а в первой — они максимальные.

Микроанализ области динамической рекристаллизации, проведенный с помощью сканирующего Рентгеномикрографа с возможностью микроанализа, показал почти идентичный химический состав как внутри этого региона (точка +1), так и за ее пределами (точка +2). На рис. 5 показаны области, где был проведен анализ,

Таблица 3. Количественные характеристики микроструктуры рельсовой стали в трех областях разрушения

Зона	Размер зерна, μm	Толщина пластин феррита, μm	Толщина пластин цементита, μm
1	28.89	1.24	0.18
2	22.57	0.87	0.11
3	5.75	0.72	0.07

а рис. 6 показывает спектр элементов отмеченных областей. Как видно из рис. 5, *a*, структура внутри области (точка +1) (размер ламелей феррита и цементита) намного мельче, чем за ее пределами (точка +2). На рис. 5, *b* отмечены точки на границе области динамической рекристаллизации (точка +1) и (точка +2), их элементный состав тоже практически идентичен между собой и между точками внутри и за пределами динамической рекристаллизации.

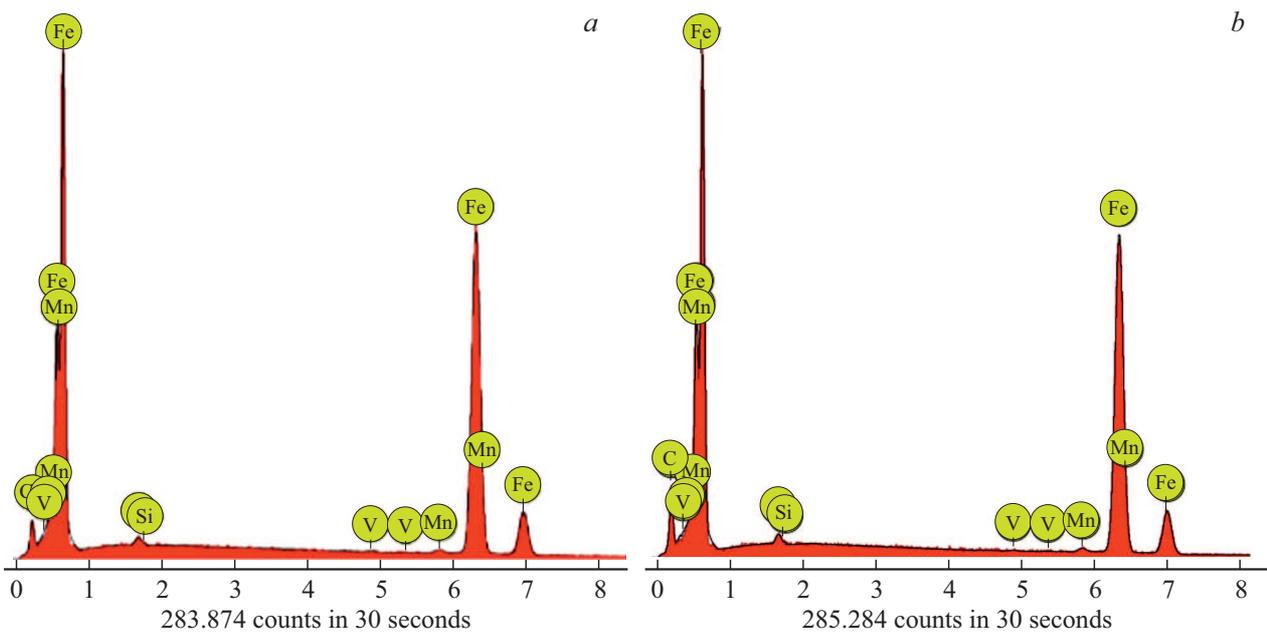


Рис. 6. Спектр элементов в зоне и на границе рекристаллизации.

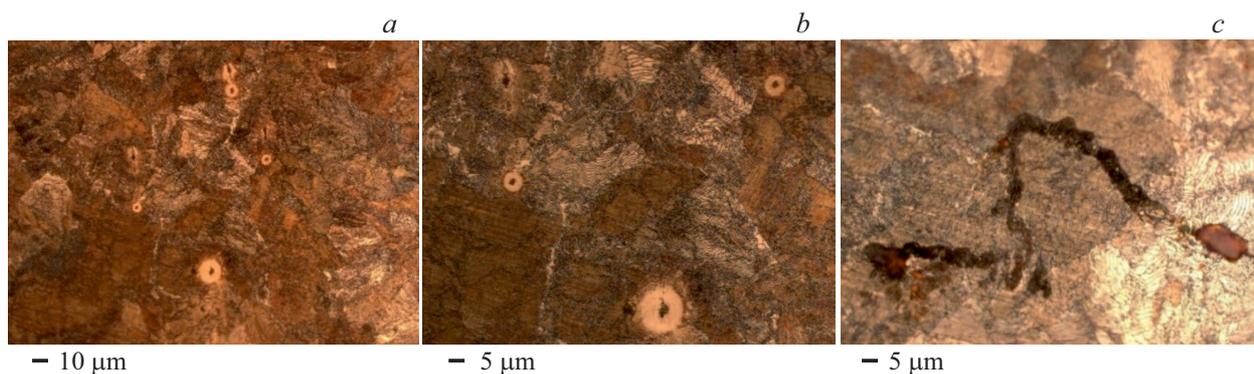


Рис. 7. Зарождение микротрещин от строчек вдоль прокатки — *a, b* и микротрещины у поверхности разрушения — *c, d*.

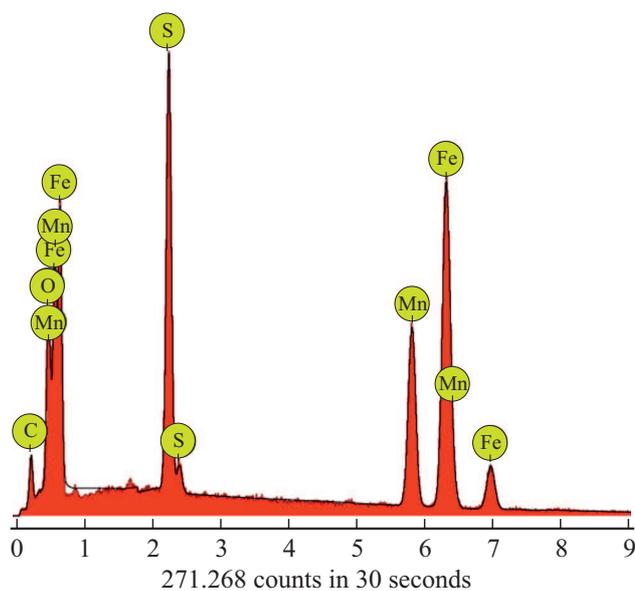


Рис. 8. Спектр элементов внутри трещины (рис. 7, *d*).

Область 2. Промежуточный этап разрушения. Началом возникновения дефекта внутренней продольной трещины являются микротрещины от скопленных неметаллических включений, вытянутых при прокатке в виде строчек-дорожек, которые видны на фото микроструктуры (рис. 7, *a, b*), а на рис. 7, *c, d* видны микротрещины, расположенные близко к поверхности разрушения.

Подтверждением зарождения трещин на неметаллических включениях является микроанализ, проведенный из области трещины (рис. 7, *d*) — внутри этой трещины выявлены сера и кислород (рис. 8) кроме остальных элементов, характерных для этой стали.

Область 3. Начальный этап разрушения. Структура начальной области разрушения в центре представляет пластинчатый перлит с довольно мелким зерном, что видно из табл. 3 и на рис. 9, *a*. Ближе к поверхности разрушения в отдельных местах этой области наблюдаются зародившиеся микротрещины вдоль строчек от прокатки (рис. 9, *b*).

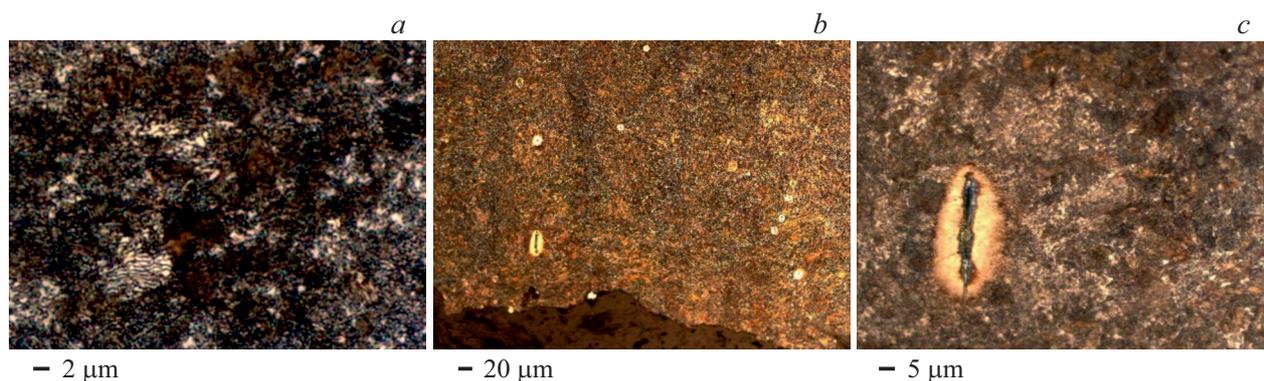


Рис. 9. Структура стали в центральной области — *a*; у поверхности разрушения — *b, c*.

4. Выводы

1. На поверхности разрушения рельса выявлено три области, различающиеся по хрупкости (% волокна в изломе) — самое хрупкое разрушение наблюдается на последнем этапе разрушения рельса, где кроме воздействия нагрузок происходит и нагрев металла.

2. Самая высокая прочность (микротвердость) наблюдается в средней самой протяженной области разрушения, что мало коррелирует с законом Холла–Петча, согласно которому наибольшая прочность должна быть в начальной стадии разрушения, где размер зерна минимальный.

3. На конечном этапе разрушения характер деформации имеет черты волнового течения с сеткой микротрещин с поверхности разрушения. С развитием разрушения размер зерна перлита увеличивается, как и размер ламелей перлита и цементита, а в некоторых местах в результате значительного нагрева и интенсивных пластических деформаций происходит разрушение зерен перлита, цементит растворяется, и образуется аустенит, а в некоторых местах пластинчатый перлит переходит в глобулярный.

4. На заключительном этапе разрушения выявлены области динамической рекристаллизации аналогичные наблюдаемым при ударном нагружении.

5. Микроанализ показал, что зарождение трещин происходит на металлических включениях, богатых серой и кислородом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.М. Тихомиров. Изв. Транссиба **13**, 101 (2013).
- [2] В.В. Каминский, Н.В. Шаренкова. ФТТ **61**, 1287 (2019).
- [3] O. Orringer, J.M. Morris. Theor. Appl. Fract. Mech. **1**, 23 (1984).
- [4] O. Orringer, J.M. Morris, D.Y. Jeong. Theor. Appl. Fract. Mech. **5**, 63 (1986).

- [5] C-S. Kim, K-W. Chung. IJR Int. J. Railway **5**, 71 (2012).
- [6] H.A. Aglan, M. Fateh. J. Mechan. Mater. Struct. **2**, 335 (2007).
- [7] S. Atroshenko. AIP Conf. Proceed. **1748**, 030005 (2016).
- [8] Ю.Ф. Иванов, К.В. Морозов, О.А. Перегудов, В.Е. Громов. Изв. вузов. Черная металлургия **59**, 576 (2016).

Редактор Т.Н. Василевская