

01,07

Анализ разрушения перлитной рельсовой стали с внутренней макротрещиной

© 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 28 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 28 ноября 2020 г.

Принята к публикации 2 декабря 2020 г.

Рассмотрен один из наиболее опасных дефектов, приводящих к поперечным изломам рельсов, а именно внутренние поперечные трещины в головке рельса. Выполнен фрактографический анализ поверхности сечения рельса с поперечной усталостной трещиной. Рельсовая проба изъята из эксплуатации после многолетнего срока службы. Микроструктурный анализ поверхности трещины и окружающего ее материала показывает существенную деградацию физико-механических свойств рельсовой стали.

Ключевые слова: рельсовая сталь, металлография, усталостная трещина, микроструктура металла, поверхность разрушения.

DOI: 10.21883/FTT.2021.05.50803.244

1. Введение

Наличие ряда неблагоприятных факторов металлургического и технологического характера приводит к возникновению в рельсах различных дефектов, в частности, внутренних поперечных трещин в головке. Подвергаясь значительным силовым воздействиям от подвижного состава, первоначальные трещины с глубиной залегания 2–6 мм от поверхности головки рельса в процессе эксплуатации распространяются от поверхности к середине головки рельса и далее в глубину. Такие трещины являются весьма опасным дефектом, так как не имеют каких-либо наружных признаков, при малых размерах не обнаруживаются дефектоскопами и в запущенной стадии роста могут приводить к поперечным изломам рельса. Кроме того, накопление остаточных напряжений сопровождается деградацией первоначальной структуры рельсовой стали. Наибольшим изменениям подвержены зерна металла, прилегающие к поверхности катания колеса.

Технические требования к рельсам в связи с развитием высокоскоростного и тяжеловесного движения и необходимости повышения их безопасности требуют понимания природы, механизмов и особенностей различных видов разрушений рельсов в эксплуатации. На основании обработки результатов полигонных испытаний рельсов с различной эксплуатационной стойкостью обнаружено [1–9], что большое влияние на стойкость к образованию контактно-усталостных дефектов оказывает однородная и мелкодисперсная микроструктура. Такие параметры микроструктуры рельсов, как величина межпластиночного расстояния в перлите, величина пер-

литных колоний, наличие избыточного феррита также оказывают большое влияние на свойства рельсов [8]. Эксплуатационная стойкость металла с более однородной структурой выше и повышается с ростом твердости только у рельсов с гомогенной структурой, при этом наибольшей конструктивной прочностью рельсов, по мнению различных авторов, обладают рельсы либо при однородной структуре сорбита закалки максимальной дисперсности, либо при однородной структуре отпущенного мартенсита.

2. Материал и методика исследования

Исследования проводились на дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсах типа Р65 с внутренней поперечной трещиной. В качестве материала исследования использовали три образца рельсовой стали, свойства и элементный состав которой регламентируются ГОСТ Р 51685–2013. Для анализа разрушения были вырезаны рельсовые пробы длиной 1.1–1.2 м, которые испытывались на статический поперечный изгиб с нагружением на подошву образцов рельса с определением показателей прочности и пластичности на прессе ПМС 320.

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, а микроструктура поперечного сечения анализировалась в светлом поле и контрасте C_DIC (Circular polarized light — differential interference contrast) на том же микроскопе.

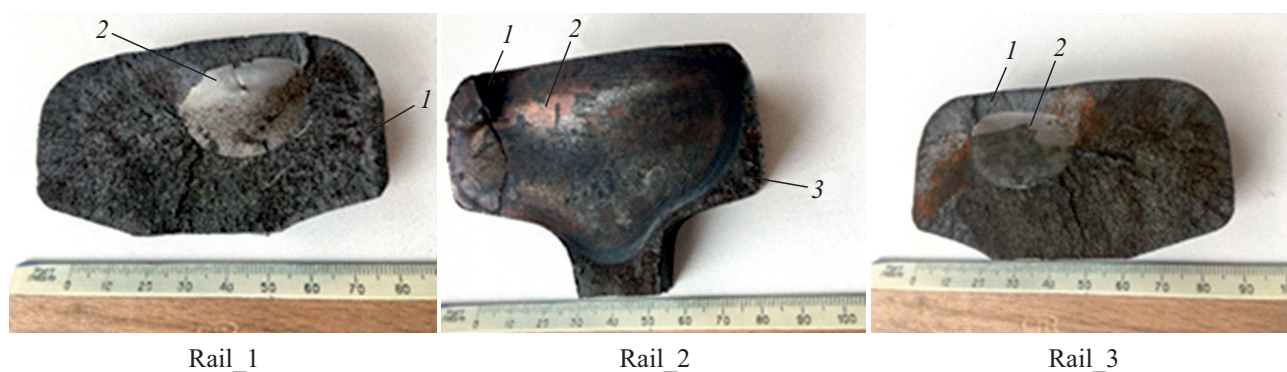


Рис. 1. Поверхность разрушения испытанных образцов рельсов.

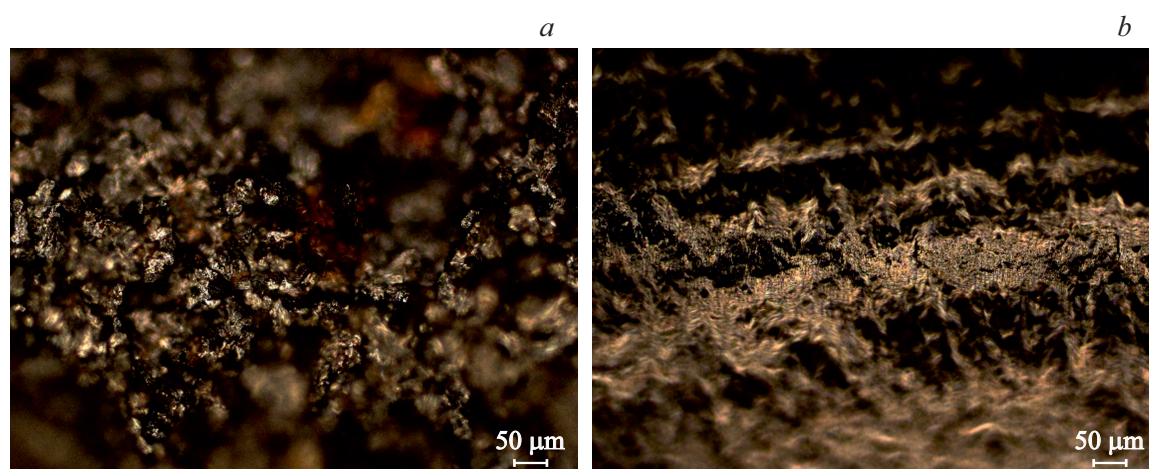


Рис. 2. Вид поверхности разрушения образца Rail_1 в первой (а) и во второй (б) области.

3. Результаты и их обсуждение

Данные испытаний на трехточечный изгиб и наименьшие приемочные показатели испытанных рельсовых проб приведены в табл. 1. Срок службы изъятых из эксплуатации рельсов 18–19 лет. За этот срок рельсы подверглись ориентировочно $22 \cdot 10^6$, $53.6 \cdot 10^6$ и $3.27 \cdot 10^6$ циклам нагружения, т.е. проходам колеса

Таблица 1. Данные испытаний и приемочные показатели испытанных рельсовых проб

Образец	F , kN	L , mm	F_{\min} , kN	L_{\min} , mm
Rail_1	86	2.2	1750	23
Rail_2	195	5.2	1750	23
Rail_3	540	5.4	1750	23

Примечание. F — разрушающая нагрузка и L — стрела прогиба, данные после испытаний на статический поперечный изгиб, F_{\min} , L_{\min} — наименьшие (допускаемые) приемочные показатели прочности и жесткости при статическом поперечном изгибе с нагружением на подошву рельса.

(соответственно образцы Rail_1, 2 и 3). Как видно из табл. 1, все испытанные рельсовые пробы совершенно не удовлетворяют нормативным требованиям прочности и жесткости, что свидетельствует о запоздалом обнаружении дефектов.

3.1. Исследование поверхности разрушения

Внешний вид поверхности разрушения испытанных образцов представлен на рис. 1, а доля вязкой составляющей на поверхности излома (% В) представлена в табл. 2. В этой таблице области измерения вязкой составляющей соответствуют указанным на рис. 1: область 2 — поверхность усталостной трещины, области 1, 3 — зоны долома образца. В табл. 2 также представлено количество волокна в переходной зоне (transition) для Rail_1 и Rail_3 образцов.

Как видно из табл. 2 и из рис. 2–4, в образцах Rail_1 и Rail_3 более хрупкое разрушение наблюдается на поверхности трещины. Что касается образца Rail_2, то здесь более хрупкой является прифронтная поверхность трещины, затем по мере развития трещины в глубину хрупкость снижается.



Рис. 3. Вид поверхности разрушения образца Rail_2 в первой (a), второй (b) и третьей (c) областях.

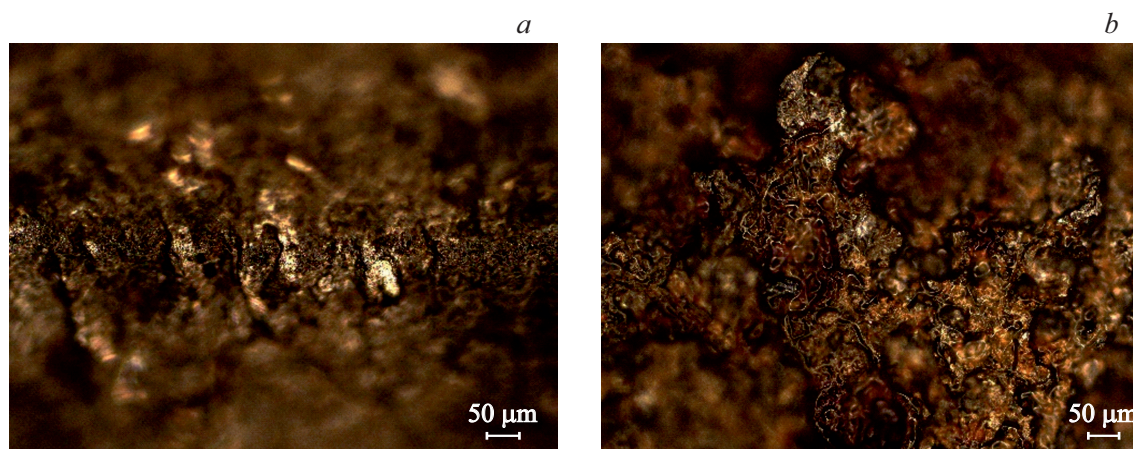


Рис. 4. Вид поверхности разрушения образца Rail_3 в первой (a) и второй (b) областях.

Такое поведение металла становится более понятным после исследования микроструктуры поперечных шлифов в соответствующих областях разрушения.

3.2. Исследование микроструктуры поперечных шлифов рельсовых образцов

3.2.1. Rail_1

1) Область 1

Структура поверхности образца Rail_1 в области 1 (рис. 1, долем рельса) представлена на рис. 5.

Видна анизотропия (направленность структуры) вблизи поверхности разрушения, а также пористость (рис. 5, a), присутствуют микротрещины, идущие от поверхности разрушения вглубь материала (рис. 5, b) и вдоль прокатки (рис. 5, c). На рис. 5, d видна структура пластинчатого перлита, а на рис. 5, e — зоны динамической рекристаллизации, аналогичные выявленным в [10]. Количественная оценка микроструктурных элементов приведена в табл. 3.

2) Область 2

Структура области 2 (рис. 1, поверхность трещины), представлена на рис. 6. Видны микротрещины в приповерхностной области разрушения (рис. 6, a). На некото-

Таблица 2. Доля вязкой составляющей (%B) в изломе рельсовых сталей

Образец	Область	%B
Rail 1	1	97.04
	2	92.18
	Переходная зона	97.60
Rail 2	1	96.18
	2	97.61
	3	92.45
Rail 3	1	96.96
	2	92.08
	Переходная зона	96.10

ром расстоянии от поверхности разрушения наблюдается полоса с избыточным ферритом в виде ферритной сетки (рис. 6, b) и зерен феррита (рис. 6, e), что вызывает охрупчивание материала (табл. 2, 3). В отдельных областях наблюдается динамическая рекристаллизация

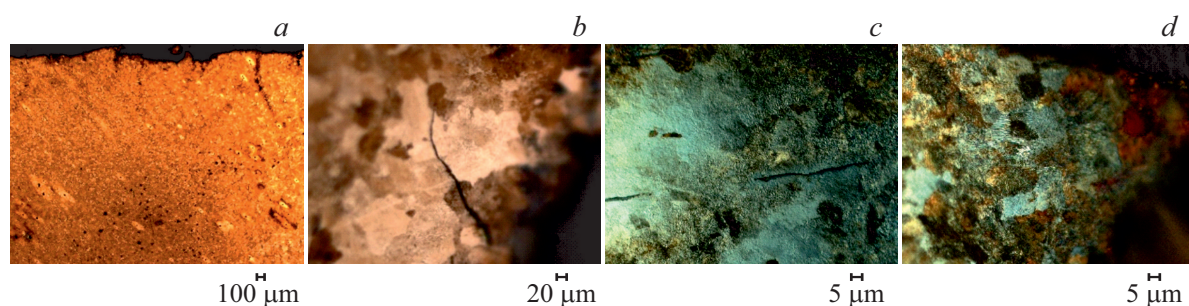


Рис. 5. Структура области 1 образца Rail_1: *a* — $\times 25$; *b* — $\times 1000$; *c, d* — $\times 1000$ (C_DIC).

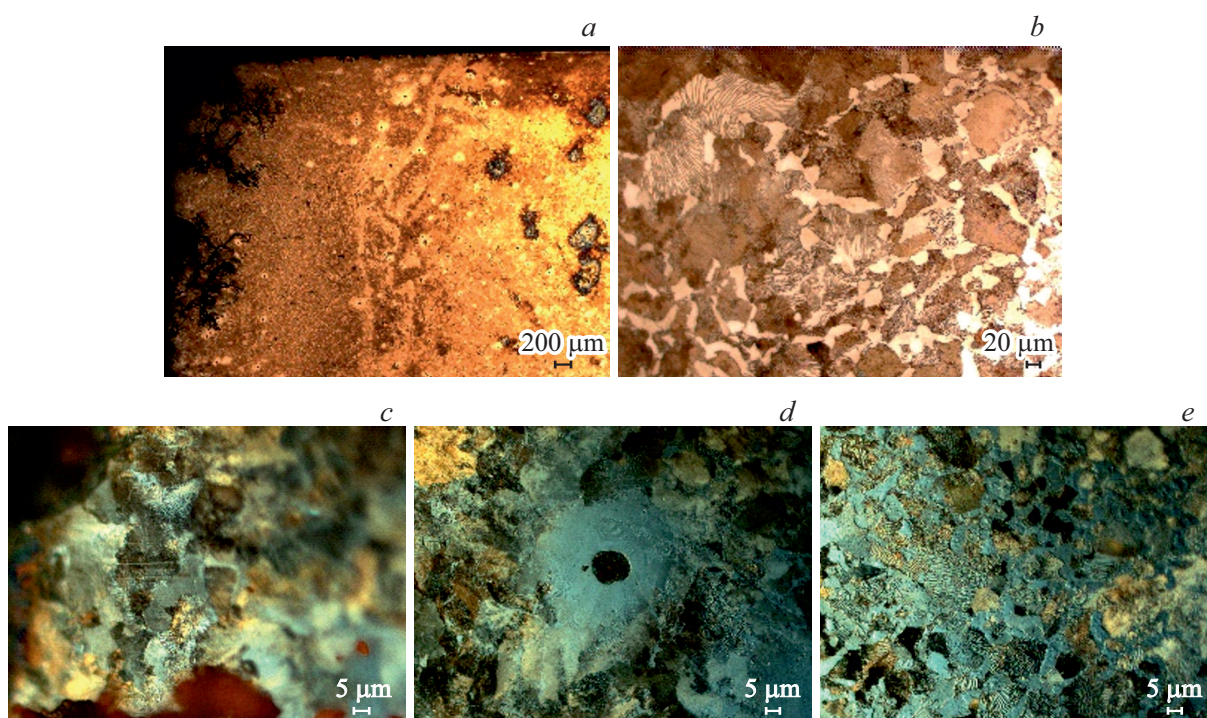


Рис. 6. Структура области 2 образца Rail_1: *a* — $\times 25$; *b* — $\times 2500$; *c, d, e* — $\times 1000$ (C_DIC).

(рис. 6, *d*) и отдельные двойники (рис. 6, *c*). Наличие двойников больше характерно для металлов с ГЦК- и ГПУ-кристаллическими решетками, которые обладают более низкой энергией дефектов упаковки (ЭДУ), чем металлы с ОЦК-решеткой, к которой относится исследуемая сталь. Появление двойников связано с мартенситным превращением и появлением двойникового мартенсита (табл. 3).

3.2.2. Rail_2

1) Область 1

Структура поверхности образца Rail_2 в области 1 (рис. 1, долот рельса) представлена на рис. 7.

В процессе циклической пластической деформации образуется наклепанный слой с микроструктурой волокнисто-деформированного перлита [6], что и наблюдается

в этой области разрушения — в приповерхностной зоне видны следы течения (рис. 7, *a*) металла, где все структурные элементы перемешались, микротрещины идут вдоль областей феррита (рис. 7, *b, c*), в некоторых местах образца видны зоны динамической рекристаллизации (рис. 7, *d*), аналогичные обнаруженным в [10].

2) Область 2

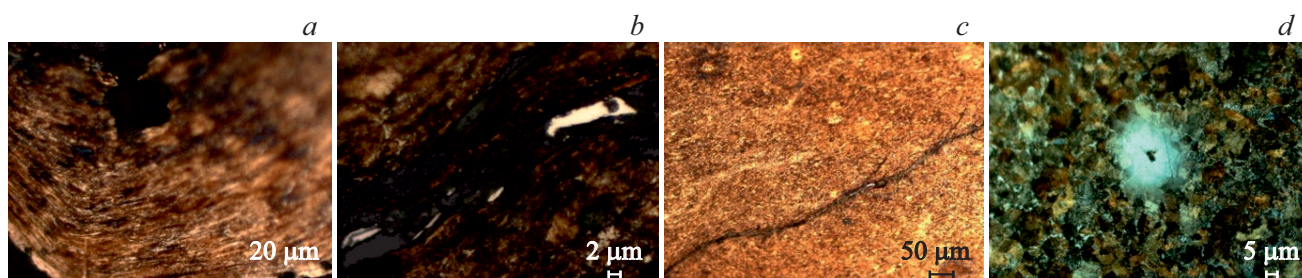
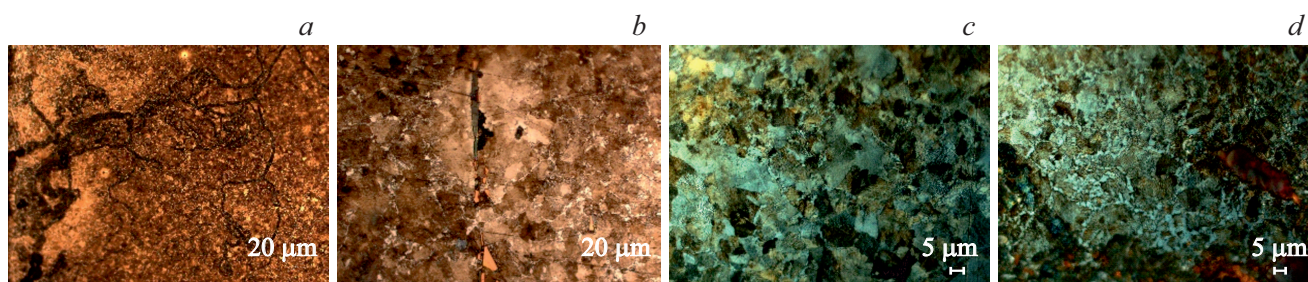
Структура материала в наиболее протяженной области разрушения 2 (рис. 1, поверхность усталостной трещины) образца Rail_2 приведена на рис. 8.

От поверхности усталостной трещины образца Rail_2 отходит сетка микротрещин (рис. 8, *a*). Зарождение последних происходит на неметаллических включениях (рис. 8, *b*), богатых серой и кислородом, что наблюдалось и на других рельсовых пробах [10]. На рис. 8, *c* видна структура пластинчатого перлита и отдельные зерна феррита, а на рис. 8, *d* — ферритная сетка.

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

Образец	Область	$D_g, \mu\text{m}$	$h_{\text{perlite}}, d_p, \mu\text{m}$	$L_{\text{tw}}, \mu\text{m} \times H_{\text{tw}}, \mu\text{m}$	$h_{\text{ferrite}}, d_f, \mu\text{m}$	Мартенсит, двойники	Избыток феррита
Rail_1	1	20.0 (8.0–45.3)	$h = 0.6$ (0.3–1.0)	–	–		
	2	11.1 (3.7–20.1)	$h = 0.4$ (0.3–0.6)	18.3 (13.7–21.5) · 0.5 (0.4–0.6)	$h = 1.4$ (0.8–2.4)	Мартенсит, двойники (16%)	Сетка и редко зерна (9%)
Rail_2	1	8.0 (4.0–12.0)	$h = 0.4$ (0.3–0.7)	–	$h = 2.6$ (0.5–1.6)		Сетка (21%)
	2	12.0 (5.5–17.5)	$h = 0.7$ (0.4–1.5)	–	$h = 1.1$ (0.4–1.8)		Тонкая сетка + зерна (45%)
	3	6.7 (3.0–11.4)	$h = 4.0$ (3.0–5.0); $d = 1.0$ (0.8–1.0)	–	–		–
Rail_3	1	15.8 (11.3–22.7)	$h = 1.0$ (0.3–1.6)	–	$h = 5.0$ (1.5–5.8); $d = 8.2$ (5.8–14.9)		Сетка + зерна (11%)
	2	13.1 (7.0–21.6)	$h = 0.7$ (0.5–0.8)	24.2 (24.0–24.3) · 0.8 (0.3–1.4)	$h = 1.2$ (0.6–1.8)	Мартенсит, двойники (10%)	Сетка (48%)

Примечание. D_g — размер зерна; h_{perlite} — межпластинчатое расстояние в перлите, d_p — диаметр глобулярного перлита; $L_{\text{tw}} \times H_{\text{tw}}$ — размеры двойников; h_{ferrite} — толщина ферритной сетки, d_f — размер ферритного зерна.

Рис. 7. Структура области 1 образца Rail_2: a — $\times 1000$; b — $\times 2500$; c — $\times 200$; d — $\times 1000$ (C_DIC).Рис. 8. Структура области 2 образца Rail_2: a — $\times 200$; b — $\times 1000$; c, d — $\times 1000$ (C_DIC).

3) Область 3

Структура стали в области 3 (рис. 1) представлена на рис. 9.

В этой области зерна имеют неравноосную вытянутую вдоль прокатки форму (рис. 9, a) (волокнисто-деформированный перлит), микротрещины идут по границам зерен феррита (рис. 9, b). Наблюдаются зоны динамической рекристаллизации и большое количество пор (рис. 9, c). На снимках также виден глобулярный

перлит, который появился в результате превращения пластинчатого перлита при нагреве стали в процессе работы рельса.

3.2.3. Rail_3

1) Область 1

Структура поверхности образца Rail_3 в области 1 (рис. 1, долом рельса) представлена на рис. 10.



Рис. 9. Структура области 3 образца Rail_2: x1000 (C_DIC).

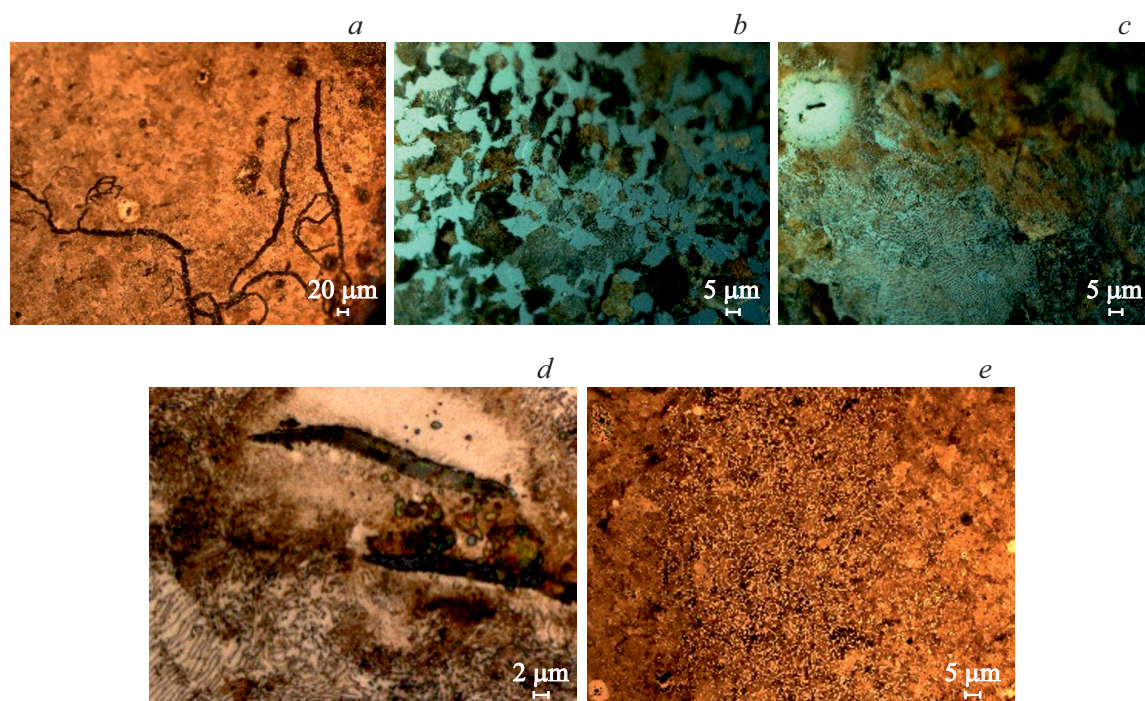


Рис. 10. Структура области 1 образца Rail_3: *a* — x200; *b, c* — x1000 (C_DIC), *d* — x2500, *e* — x100.



Рис. 11. Структура области 2 образца Rail_3: *a, b* — x1000 (C_DIC), *c* — x100.

Вблизи поверхности разрушения наблюдается сетка микротрещин (рис. 10, *a*), глубже от поверхности разрушения видно много ферритных зерен (рис. 10, *b*). Присутствуют также области динамической рекристаллизации наряду с довольно крупными зернами пластинчатого перлита (рис. 10, *c*). Микротрещины идут по ферритной сетке и в ферритных зернах (рис. 10, *d*). На рис. 10, *e* представлена полоса избыточного феррита в виде ферритной сетки.

2) Область 2

На рис. 11 представлена структура поверхности образца Rail_3 в области 2 (поверхность усталостной трещины).

Присутствуют зоны динамической рекристаллизации (рис. 11, *a*), а на рис. 11, *b* видно зарождение трещины на неметаллических включениях, также видны двойники. Избыточный феррит представлен в виде сетки (рис. 11, *c*), что способствует охрупчиванию стали.

4. Заключение

1. Значительное влияние на сопротивление усталостному разрушению оказывает объем феррита в зоне образования трещины: чем оно меньше, тем выше устойчивость к разрушению.

2. На поверхности разрушения исследованных образцов рельсовой стали выделяются области, отличающиеся по хрупкости: наиболее хрупкое разрушение в образцах Rail_1 и Rail_3 наблюдается на стадии усталостного роста трещины, где наблюдается избыточный феррит в виде разветвленной сетки, которая занимает большую площадь поверхности, а также присутствует мартенсит и двойники, что способствует снижению пластичности.

3. Образец Rail_2 отличается наибольшей хрупкостью в приповерхностной области головки рельса, что можно объяснить наличием грубой ферритной сетки с самой большой толщиной, а также самым дисперсным перлитом.

4. Наиболее высокая разрушающая нагрузка и стрела прогиба наблюдаются для образца Rail_3, что объясняется не только меньшим размером трещины, по сравнению с другими пробами, но и наличием мартенсита, мелкодисперсного перлита с относительно мелким зерном, а также динамической рекристаллизацией с образованием микроструктурных зон высокой твердости.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.А. Шур. Повреждение рельсов. Интекст, М. (2012). 192 с.
- [2] А.Ю. Абдурашитов. РСП Эксперт **66**, 10, 21 (2014).

- [3] W. Harris, S.M. Zakharov, J. Lundgren, H. Tournay, W. Ebersohn. Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail interface issues. International Heavy Haul Association 2808 Forest Hill Court Virginia Beach, Virginia 23454, USA (2001). 408 p.
- [4] M. Dembosky. Permanent Way Institution **124**, 2, 72 (2006).
- [5] G. Girsch, R. Heyder. Railway Gazette Int. **1**, 42 (2004).
- [6] Е.А. Шур, А.И. Борц, А.В. Сухов, А.Ю. Абдурашитов, Л.В. Базанова, К.Л. Заграничек. Вестн. ВНИИЖТ **3**, 3 (2015).
- [7] Е.А. Шур, В.М. Федин, А.И. Борц, Ю.В. Ронжина, А.И. Фимкин. Вестн. ВНИИЖТ **4**, 210 (2019).
- [8] Е.В. Полевой, А.Б. Добужская, М.В. Темлянецев. Вестн. ПНИПУ **18**, 4, 7 (2016).
- [9] Ю.Ф. Иванов, К.В. Морозов, О.А. Перегудов, В.Е. Громов. Изв. вузов Черная металлургия **59**, 576 (2016).
- [10] С.А. Атрошенко, С.С. Майер, В.И. Смирнов. ФТТ **62**, 10, 1573 (2020).

Редактор Ю.Э. Кутаев