

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ*

Л.Р. Ботвина, Ю.А. Демина, И.М. Петрова, И.В. Гадолина, А.М. Арсенкин

В статье приводятся результаты усталостных испытаний серии плоских образцов, изготовленных из рельсовой стали Э76Ф в состояниях поставки и после пропуска по рельсам 480 млн тонн брутто груза. Испытания проведены по схеме поперечного изгиба при консольном симметричном нагружении. Были исследованы накопление усталостных повреждений и параметры кривых усталости, проведена оценка рассеяния характеристик сопротивления усталости. В результате установлено, что рассеяние этих характеристик у образцов из рельсовой стали после эксплуатации меньше, чем разброс аналогичных характеристик до эксплуатации. Выявлено ухудшение характеристик сопротивления усталости у образцов после эксплуатации, связанное с образованием микротрещин вблизи включений и дефектов контактной усталости, возникших в процессе длительной эксплуатации. Для изучения особенностей зарождения и развития трещин были выполнены фрактографические исследования разрушенных образцов. Такие исследования усталостных образцов позволили также обнаружить большое количество расслоений на изломах и боковой поверхности образцов из стали Э76Ф как в состоянии до, так и после эксплуатации. Длина этих расслоений, их раскрытие и количество увеличились после эксплуатации.

Ключевые слова: длительная эксплуатация, рельсовая сталь Э76Ф, механические свойства, долговечность

EXPLOITATION INFLUENCE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF RAIL STEEL

L.P. Botvina, Yu.A. Demina, I.M. Gadolina, A.M. Arsenkin

In the article there are presented results of fatigue tests series on plate samples made from E76F rail steel in the states of delivery and after passing 480 million tones of gross loads on rails. Tests were carried out according to transverse bending scheme at cantilever symmetric loading. Fatigue defects accumulation and fatigue curves were studied; spreading fatigue strength parameters has being evaluated. Results have been proved that the parameters spreading of rail steel samples after exploitation was less then a spread of the same parameters before exploitation. Fatigue strength parameters of samples after exploitation became worse because of mikrocracks formation closed to the contact fatigue spots and defects occurred at long term exploitation. Fractographic examination of damaged samples was made for studying the cracks formation and development. This fatigue samples examination allowed authors to observe many laminations on fractures and flanks of steel samples in conditions before exploitation as well as after that. Laminations length, their opening and amount were increased after exploitation.

Keywords: long term exploitation, E76F rail steel, mechanical properties, durability.

Введение

Проблема повышения качества и продления эксплуатационного ресурса железнодорожных рельсов сохраняет свою актуальность на протяжении многих лет [1–3]. В последние десятилетия эта проблема стала еще более острой

в связи с развитием высокоскоростного пассажирского и тяжеловесного грузового железнодорожного движения. Основными причинами разрушения железнодорожных рельсов явля-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и ОАО «РЖД», проект «офи_м_РЖД» № 12-08-13182.

ются контактная усталость и износ, исследованию которых посвящено большое количество работ, в частности [4, 5]. Менее изученными остаются вопросы усталостного разрушения железнодорожных рельсов, связанные, вероятно, с трудностью и длительностью проведения исследований накопления усталостных повреждений [6].

Целью данной работы является изучение характеристик сопротивления усталости и особенностей зарождения и роста усталостных трещин в рельсовой стали Э76Ф в процессе эксплуатации.

Методы и результаты исследования

Для исследования усталостного сопротивления и особенностей образования трещин в рельсах были проведены усталостные испытания серии плоских образцов (рис. 1) из рельсовой стали Э76Ф. Толщина образца равна 2 мм. Методика проведения усталостных испытаний соответствовала ГОСТ 25.502 «Методы механических испытаний на усталость. Методы испытаний на усталость». Образцы были вырезаны из головки рельс параллельно плоскости поверхности катания на расстоянии до 3 мм от поверхности катания, в состояниях до эксплуатации (состояние поставки) и после пропуска по рельсам 480 млн тонн (брутто) груза. Головки рельс после эксплуатации имели контактно-усталостные дефекты, что позволило оценить их влияние, а также влияние деградации структуры рельсовой стали в процессе циклической пластической деформации на усталостные характеристики рельсовой стали. Вырезка заготовок, маркирование и изготовление образцов не оказали существенного влияния на усталостные свойства исходного материала. В пределах намеченной серии испытаний все образцы испытывали одним способом по схеме поперечного изгиба при консольном симметричном нагружении с частотой 25 Гц. Испытаниям подвергались 18 образцов при различных амплитудах нагружения.

При малом количестве образцов и отсутствии предварительных экспериментальных данных для выбора первого значения напряжения при испытаниях, в соответствии с рекомендациями ГОСТ 25.504, использовали

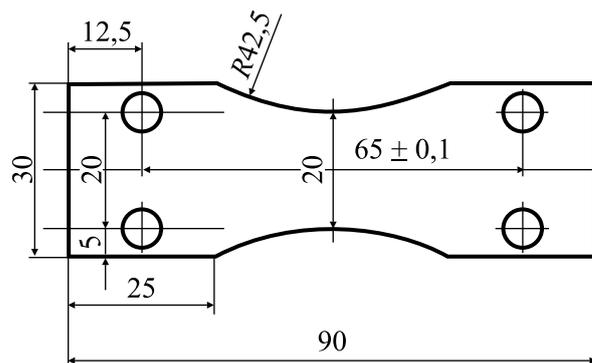


Рис. 1. Геометрия образца для усталостных испытаний

справочную информацию о соотношении характеристик прочности и выносливости конструкционных сталей.

В этом случае предел выносливости σ_{-1} при изгибе с вращением гладкого лабораторного образца диаметром $d_0 = 7,5$ мм допускается оценивать по соотношению $\sigma_{-1} = (0,55 - 0,0001\sigma_b)\sigma_b$, где σ_b – предел прочности исследуемого материала (МПа). В зависимости от целей испытания можно назначать первый уровень напряжений, несколько превышающий полученное численное значение σ_{-1} .

Образцы стали марки Э76Ф, химический состав которой приведен ниже, подвергались закалке в масле при температуре +840 °С с последующим отпуском при температуре +440 °С. Проведенный металлографический анализ исследуемой стали выявил феррито-пер-

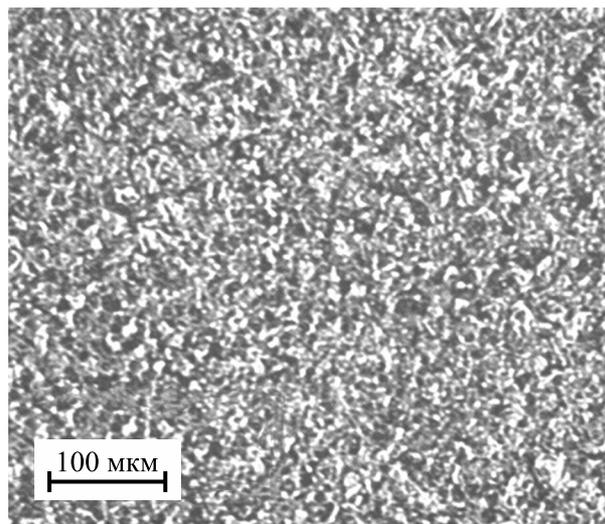


Рис. 2. Структура исследуемой стали марки Э76Ф

| Химический состав стали марки Э76Ф | C | Si | Mn | Cu | Ni | Cr | Al |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| %, масс. | 0,77 | 0,36 | 1,68 | 0,13 | 0,08 | 0,07 | 0,02 |

Таблица 1

Механические характеристики стали Э76Ф

| Состояние | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ | δ , % | σ_{-1} , МПа |
|---|----------------------|------------------|-------------------------|--------------|---------------------------------|
| Исходное | 904 | 1341 | 0,67 | 12,98 | 400 ($N = 3,3 \cdot 10^6$) |
| После пропуска по рельсам 480 млн тонн (брутто) груза | 919 | 1054 | 0,87 | 3,7 | 355 ($N = 3,6 \cdot 10^5$) |

Примечание: в последнем столбце в скобках указано число циклов N – база испытаний

литную структуру со средним размером зерна 15 мкм (рис. 2).

Кривые усталости (рис. 3) и стандартные механические характеристики исследуемой стали (табл. 1) оценивались в состоянии до и после эксплуатации.

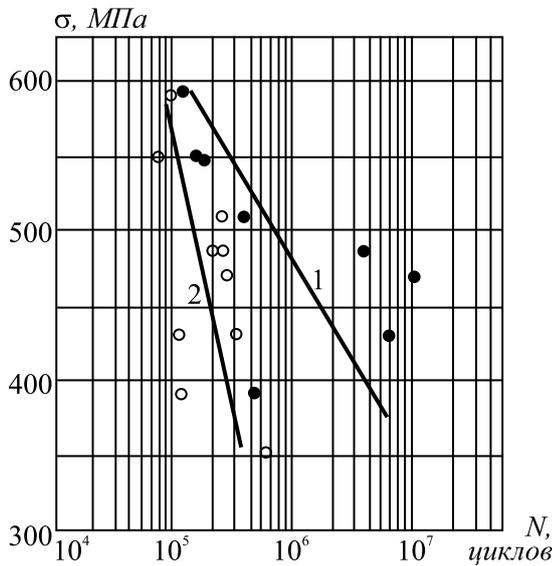


Рис. 3. Кривые усталости образцов из стали Э76Ф в состояниях до (1) и после эксплуатации (2), σ_a – действующее напряжение

Результаты усталостных испытаний образцов (табл. 2) свидетельствуют о том, что эксплуатация рельсов из стали Э76Ф привела к снижению предела прочности материала (σ_B) на 21% и относительного удлинения (δ) на 72%, увеличению предела текучести ($\sigma_{0,2}$) на 2%, а также к значительному снижению ограниченного предела выносливости (σ_{-1}) – с 400 МПа на базе испытаний $N = 3,3 \cdot 10^6$ циклов нагружения до 355 МПа на базе испытаний $N = 3,6 \cdot 10^5$ циклов нагружения. Параметры кривых усталости, представленных на рис. 3, определяли методом регрессионной обработки. При этом снижение циклической прочности исследуемой стали после эксплуатации сопровождалось увеличением угла наклона кривой усталости по сравнению с исходным состоянием на всем интервале изменения долговечности.

Уравнение кривой усталости записывали в виде:

$$\sigma_{ai}^m N_i = \sigma_{-1}^m N_G,$$

где σ_{ai} – задаваемый i -й уровень действующих напряжений; N_i – значение долговечности, со-

Таблица 2

Результаты испытаний образцов из рельсовой стали марки Э76Ф

| До эксплуатации | | После эксплуатации | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Напряжение σ_{ai} , МПа | Число циклов до разрушения N | Напряжение σ_{ai} , МПа | Число циклов до разрушения N |
| 592 | $1,2 \cdot 10^5$ | 592 | $9,6 \cdot 10^4$ |
| 550 | $15 \cdot 10^5$ | 550 | $7,2 \cdot 10^4$ |
| 550 | $1,8 \cdot 10^5$ | 511 | $2,3 \cdot 10^5$ |
| 511 | $3,4 \cdot 10^5$ | 487 | $2,06 \cdot 10^5$ |
| 487 | $3,9 \cdot 10^6$ | 487 | $2,3 \cdot 10^5$ |
| 471 | 10^7 | 471 | $2,7 \cdot 10^5$ |
| 432 | $6,02 \cdot 10^6$ | 432 | $1,06 \cdot 10^5$ |
| 393 | $4,1 \cdot 10^5$ | 432 | $3,04 \cdot 10^5$ |
| | | 393 | $1,2 \cdot 10^5$ |
| | | 355 | $5,5 \cdot 10^5$ |

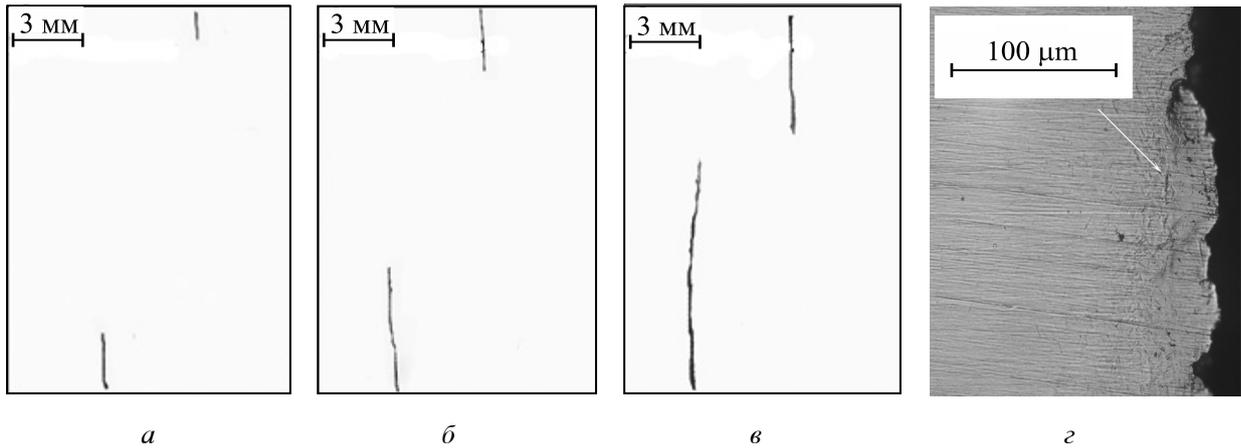


Рис. 4. Картины множественного разрушения (а–в) и зоны поврежденности (z) образцов из стали Э76Ф в состоянии до эксплуатации ($\sigma = 592$ МПа) при значениях долговечности: а – $N = 93980$, б – $N = 107840$, в – $N = 116420$, z – $N = 120890$ циклов

ответствующее σ_{ai} ; σ_{-1} – предел выносливости, соответствующий стандартной базе испытаний 10^7 (ГОСТ 25.502); N_G – число циклов, соответствующее точке перелома кривой усталости; m – показатель наклона кривой усталости.

Полученные уравнения кривых усталости до эксплуатации имели вид

$$8,37 \lg \sigma_{ai} + \lg N_i = 28,3,$$

$$\text{и } 2,77 \lg \sigma_{ai} + \lg N_i = 12,6 \text{ после эксплуатации.}$$

Рассеяние долговечности было определено по методике, предложенной в работе [7], согласно которой каждому образцу соответствует своя кривая усталости. Это позволяет оценить рассеяние характеристик сопротивления усталости для заданной долговечности или для заданного уровня напряжений по результатам испытаний ограниченного числа образцов. Полученный коэффициент вариации долговечности, выраженной в $\lg N$ на уровне нагружения

$\sigma_{ai} = 550$ МПа, равен для образцов в состоянии до эксплуатации $v_{\lg N} = 0,098$ при среднем значении долговечности на этом уровне $\lg N = 5,71$, а для образцов в состоянии после эксплуатации – $v_{\lg N} = 0,009$, $\lg N = 4,69$. Из полученных результатов следует, что разброс характеристик сопротивления усталости образцов из рельсовой стали после эксплуатации меньше, чем разброс аналогичных характеристик до эксплуатации.

Исследование кинетики накопления повреждений в образцах из исследуемой стали с помощью метода реплик позволило обнаружить некоторые особенности развития трещин при высоких амплитудах нагружения в состояниях до и после эксплуатации (рис. 4 и 5). Реплики снимали с полированной поверхности образцов на разных стадиях циклического нагружения и затем исследовали с помощью оптического

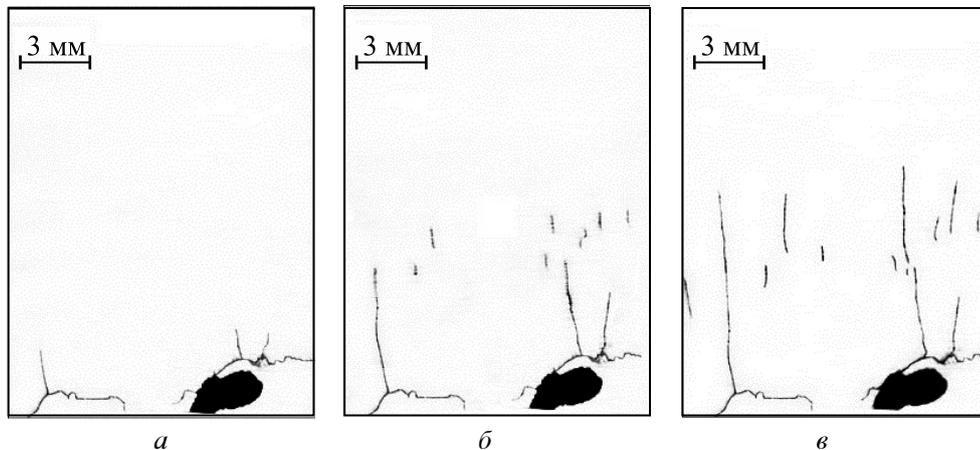


Рис. 5. Картины множественного разрушения образцов из стали Э76Ф в состоянии после эксплуатации ($\sigma = 550$ МПа) при значениях долговечности: а – $N = 4110$, б – $N = 30540$, в – $N = 56730$

микроскопа *Neophot-32*, снабженного цифровой камерой.

С помощью метода реплик было обнаружено, что в образце из стали Э76Ф в исходном состоянии развитой картины микротрещин не наблюдалось, а разрушение образца происходило путем образования встречных трещин и последующего их слияния (см. рис. 4, *а-в*). Однако исследование боковой полированной поверхности разрушенных образцов на оптическом микроскопе *Neophot-32* позволило обнаружить зону поврежденности шириной не более 50 мкм и мелкие микротрещины в зоне длиной ~4 мкм.

В образце после эксплуатации зарождение трещины происходило на контактно-усталостных дефектах с последующим ее развитием вследствие слияния с микротрещинами, минимальная длина которых составляла ~300 мкм (см. рис. 4, *г*, рис. 5). Оценить величину типичного дефекта контактной усталости можно на рис. 4 и 5.

Долговечность образцов из стали Э76Ф после эксплуатации ($N \sim 4 \cdot 10^3$ циклов) на этапе зарождения трещины значительно меньше долговечности образцов из стали в исходном состоянии ($N \sim 9 \cdot 10^4$ циклов). Это может свидетельствовать о повышении скорости роста усталостной трещины в исследуемом материале после эксплуатации.

Причина снижения долговечности была выявлена и путем фрактографических исследований (рис. 6–8), выполненных на сканирующем микроскопе *Leo 430i* и показавших в материале после эксплуатации наличие множественных очагов зарождения трещины на контактно-усталостных дефектах (на рисунках показаны стрелкой).

Фрактографические исследования усталостных образцов в состоянии до (см. рис. 6, *а* и 7, *а*) и после (см. рис. 6, *в*; рис. 7, *б*) эксплуатации позволили обнаружить большое количество расслоений на изломах (см. рис. 6, *б-в*; рис. 7, *а-б*, показаны стрелкой) и на боковой поверхности (см. рис. 5, *б*, показаны стрелкой) образцов из стали Э76Ф. Длина расслоений, их раскрытие и количество увеличились после эксплуатации образцов (см. рис. 6, *б-в* и рис. 7, *а-б*).

Кроме этого, на изломах образцов в состоянии до (см. рис. 6, *а*) и после (см. рис. 7, *в*) эксплуатации были обнаружены множественные неметаллические включения (алюмосиликаты кальция), которые также служили очагами зарождения трещин (см. рис. 6, *а* и рис. 7, *в*, показаны стрелками) в образцах. Состав включений представлен в табл. 3.

Анализ результатов

Из полученных результатов можно заключить, что снижение долговечности исследуемой стали после эксплуатации вызвано ранним зарождением трещин на контактно-усталостных дефектах и включениях. Фрактографические исследования показали в материале после эксплуатации наличие множественных очагов зарождения трещин на контактно-усталостных дефектах и позволили обнаружить множество расслоений на изломах образцов, количество которых увеличилось после эксплуатации. Обнаруженные множественные неметаллические включения также стали очагами зарождения трещины.

Исследования показали небольшое увеличение скорости роста усталостной трещины в образцах из рельсовой стали после эксплуатации, по сравнению со скоростью роста в образцах из

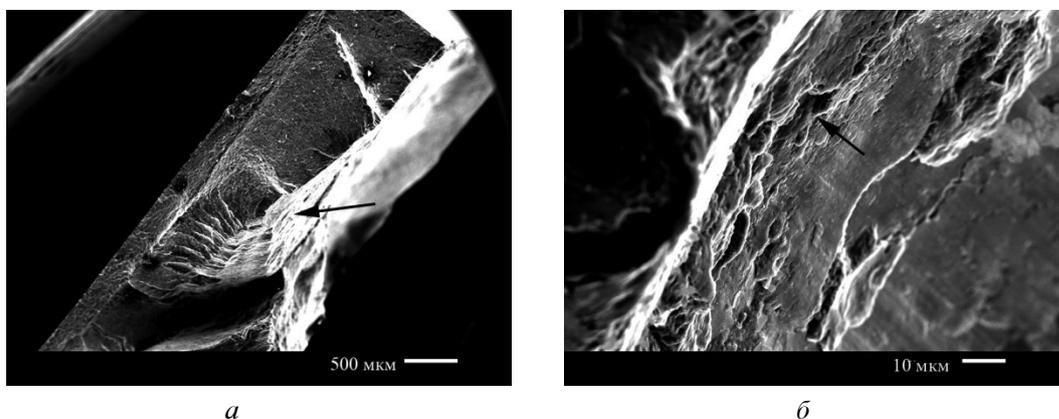
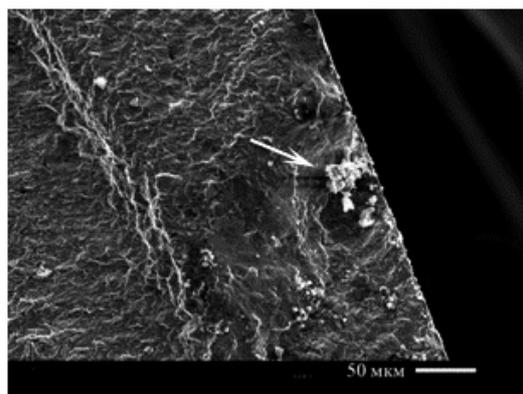
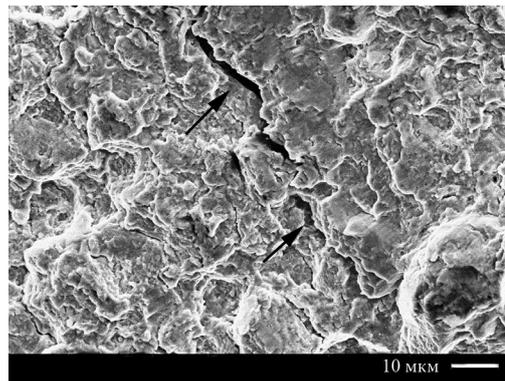


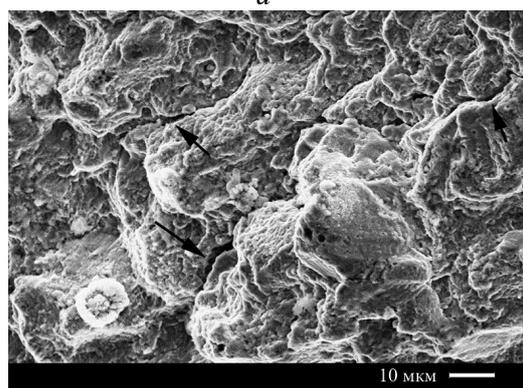
Рис. 6. Микрорельеф (*а*) и боковая поверхность (*б*) образцов из стали марки Э76Ф в состоянии после эксплуатации при $\sigma = 432$ МПа



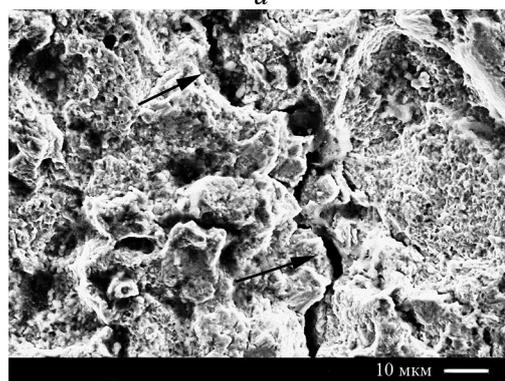
а



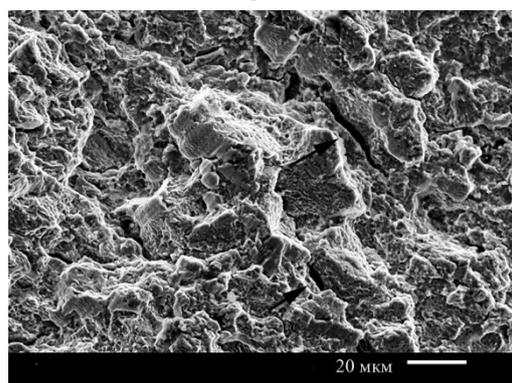
а



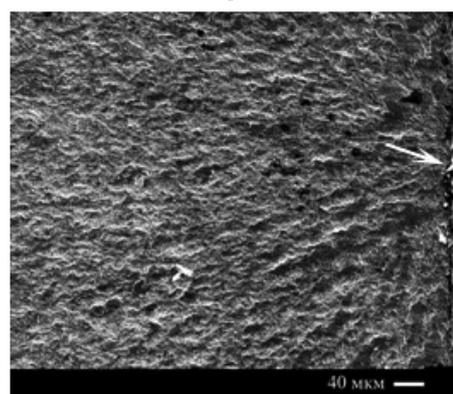
б



б



в



в

Рис. 7. Микрорельеф образцов из стали марки Э76Ф в состоянии до эксплуатации (а, б) и после эксплуатации (в) при $\sigma = 592$ МПа

Рис. 8. Микрорельеф образцов из стали марки Э76Ф в состоянии до (а) и после эксплуатации (б, в) при $\sigma = 487$ МПа

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 3

Химический состав включений на изломах образцов из стали Э76Ф

| Содержание элементов | O | Al | Si | Ca | Fe |
|--|-------|-------|------|-------|-------|
| <i>Включения, наблюдающиеся в состоянии до эксплуатации (см. рис. 6, а)</i> | | | | | |
| % , вес. | 6,66 | 81,71 | 1,37 | 3,73 | 6,53 |
| % , атом | 11,25 | 81,77 | 1,32 | 2,51 | 3,16 |
| <i>Включения, наблюдающиеся в состоянии после эксплуатации (см. рис. 7, в)</i> | | | | | |
| % , вес. | 42,91 | 0,46 | 1,23 | 39,42 | 15,97 |
| % , атом | 66,84 | 0,43 | 1,09 | 24,51 | 7,13 |

исследуемой стали в исходном состоянии, что также отмечалось в работе [8]. Причем разрушение образцов сопровождалось образованием хрупких фасеток скола, доля которых возросла после эксплуатации. Для объяснения особенностей роста усталостной трещины в образцах из рельсовой стали в работе [9] приведена удельная энергия поврежденности (γ') и показано, что указанная характеристика является константой материала и характеризует его способность к сопротивлению росту усталостной трещины. Причем, чем выше значение удельной энергии поврежденности, тем сильнее сопротивление и тем более развита зона поврежденности, наблюдаемая на боковой поверхности образцов. В исследованиях [10] было получено снижение циклической прочности, которое, возможно, было следствием деградации материала, происходящей со временем даже без нагрузки и вызванной развитием повреждений по межфазным границам и расслоений в результате протекания процессов деформационного старения. Результаты данной работы также показали развитие множественных расслоений на изломах и боковых поверхностях образцов, наличие которых может иметь серьезные последствия при накоплении повреждений, особенно в условиях развития высокоскоростного пассажирского и тяжеловесного железнодорожного движения. В рельсовых сталях развитию этих расслоений могут способствовать остаточные напряжения, возникшие в результате технологических процессов, контакта «колесо–рельс» и других факторов [11–12].

Наличие неметаллических включений также оказывает существенное влияние на изменение усталостных свойств и преждевременное разрушение рельсовых сталей [13–14]. Авторы работы [13] изучили влияние неметаллических включений на механические свойства рельсовых сталей при статическом и циклическом нагружении, а также трещиностойкость. Результаты этих исследований показали, что трещиностойкость и предел выносливости исследуемых рельсовых сталей чувствительны к типу включений и их объемной доли. Указанные характеристики тем выше, чем ниже доля сульфидных включений при оценке трещиностойкости и оксидных при оценке предела выносливости. Кроме этого, исследование образцов с помощью сканирующего электронного микроскопа позволило авторам обнаружить,

что именно оксидные включения в случае усталостного нагружения оказались очагами зарождения трещины. При этом влияния включений на пределы текучести и прочности, а также относительное удлинение обнаружено не было.

Заключение

Оценены механические свойства рельсовой стали Э76Ф в исходном состоянии и после эксплуатации при статическом и циклическом нагружении.

В результате проведенных исследований установлено снижение циклической прочности на всем интервале изменения долговечности по сравнению с исходным материалом, вызванное ранним образованием микротрещин вблизи дефектов контактной усталости, возникших в процессе длительной эксплуатации.

Полученные результаты характеризуют влияние эксплуатационных факторов на деградацию характеристик сопротивления усталости и их рассеяние, что имеет большое значение для научных исследований и практических целей.

Список литературы

1. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: Фундаментальные и прикладные исследования: моногр. М.: Наука, 2008. – 528 с.
2. Шур Е.А. Повреждения рельсов: моногр. М.: Интекст, 2012. – 192 с.
3. Smith R.A. Fatigue in transport. Problems, solutions and future threats // Trans IChemE. 1998. Vol. 76. Part B. P. 217–223.
4. Franklin F.J., Kapoor A. Modelling wear and crack initiation in rails // Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit (special issue). 2007. Vol. 221, No. 1. P. 23–33.
5. Deters L., Proksch M. Friction and wear testing of rail and wheel material // Wear. 2005. Vol. 258. P. 981–991.
6. Maya-Johnson S., Ramirez A.J., Toro A. Fatigue crack growth rate of two pearlitic rail steels // Engineering Fracture Mechanics. 2015. Vol. 138. P. 63–72.
7. Петрова И.М., Гадолина И.В. Оценка рассеяния характеристик сопротивления усталости по результатам испытаний ограниченного числа образцов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 11. С. 50–52.
8. Bulloch J.H. The Growth of fatigue cracks in rail steel // Journal of the South African Institute of

- Mining and Metallurgy. 1987. Vol. 87. No. 4. P. 93–106.
9. Aglan H., Gan Y.X. Fatigue crack growth analysis of a premium rail steel // Journal of Materials Science. 2011. Vol. 36. P. 389–397.
10. Влияние длительного старения на характеристики усталости стали 45 / И.М. Петрова, И.В. Гадолина, Л.Р. Ботвина, Ю.А. Демина, М.Р. Тютин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 1. С. 58–61.
11. Sasaki T. et al. Measurement of residual stresses in rails by neutron diffraction / Wear. 2008. No. 265. P. 1402–1407.
12. Kelleher J. et al. The Measurement of residual stress in railway rails by diffraction and other methods / Journal of Neutron Research. 2003. Vol. 11. Issue 4. P. 187–193.
13. Dhuva S.K. et al. Influence of nonmetallic inclusion characteristics on the mechanical properties of rail steel / Journal of Materials Engineering and Performance. 2000. Vol. 9. Iss. 6. P. 700–709.
14. Разработка фундаментальных основ создания сталей для высокоскоростного железнодорожного транспорта с повышенной контактно-усталостной прочностью / К.В. Григорович, А.М. Арсенкин, А.К. Гербер и др. // Материалы Третьей международной научно-практической конференции «ИнтеллектТранс-2013». М.: Изд-во «Перо», 2013. С. 296–299.

Материал поступил в редакцию 20.07.2015

**БОТВИНА
Людмила Рафаиловна**

E-mail: botvina@imet.ac.ru
Тел.: (499) 135-96-83

Доктор технических наук, главный научный сотрудник ИМЕТ РАН. Сфера научных интересов – прочность, кинетика разрушения, усталость, диагностика разрушения, фрактография. Автор 300 научных работ.

**ДЕМИНА
Юлия Андреевна**

E-mail: deminayulia@mail.ru
Тел.: (499) 135-96-83

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИМЕТ РАН. Сфера научных интересов – механика разрушения, кинетика накопления повреждений, остаточная прочность, деградация. Автор 30 научных работ.

**ПЕТРОВА
Ирина Михайловна**

E-mail: impetr@mail.ru
Тел.: (499) 135-30-74

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИМАШ РАН. Сфера научных интересов – прочность, усталость материалов, накопление повреждений с учетом конструктивных, технологических, эксплуатационных факторов, оценка долговечности. Автор 105 научных работ.

**ГАДОЛИНА
Ирина Викторовна**

E-mail: gadolina@mail.ru
Тел.: (499) 135-30-74

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИМАШ РАН. Сфера научных интересов – прочность, усталость материалов, накопление повреждений с учетом конструктивных, технологических, эксплуатационных факторов, оценка долговечности. Автор 52 научных работ.

**АРСЕНКИН
Александр Михайлович**

E-mail: alex_arsenkin@yahoo.com
Тел.: (499) 135-94-45

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Сфера научных интересов – физика прочности и разрушения, количественная металлография, сканирующая электронная микроскопия. Автор 40 научных работ.