



УДК 669.017.16:669.018.294.2
DOI 10.17073/0368-0797-2024-6-653-659



Оригинальная статья
Original article

О РЕЗУЛЬТАТАХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

И. А. Олифиренко^{1,2}, Т. Н. Осколкова¹, Е. В. Полевой²

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

✉ oskolkovatiana@yandex.ru

Аннотация. Большое влияние на потребительские свойства рельсов оказывает стойкость металла к образованию дефектов контактной усталости и развитию износа. Наиболее значимыми факторами, лимитирующими срок службы рельсов в кривых участках железнодорожного пути, являются износ рельсов наружных нитей и развитие дефектов контактной усталости во внутренних нитях пути. В связи с этим при разработке новой продукции важное значение приобретают методы достоверной лабораторной оценки стойкости рельсового металла. В работе описывается изменение характера повреждаемости рельсов различных категорий твердости дефектами контактной усталости, проводится оценка их износостойкости. Исследование дефектов и прогнозирование ресурса рельсов требуют комплексного подхода. Приводится краткое описание моделирования условий образования и накопления контактно-усталостных дефектов. Рассматриваемые параметры оказывают влияние на износостойкость рельсового металла различного химического состава. В процессе испытаний изменяются микроструктура рельсов и характер роста трещин. Авторы провели сравнительный анализ полученных данных, характеризующих износостойкость рельсовых сталей различных категорий твердости. Основой методики оценки износостойкости железнодорожных рельсов является физическое моделирование процесса адгезионно-деформационного механизма трения образцов на роликовой машине трения (трибометр). При проведении лабораторных испытаний исследуемых категорий рельсов машина трения автоматически выдает и фиксирует целый ряд вычислительных параметров, показанных в работе. Проведенные исследования являются перспективными с практической точки зрения. Полученные результаты могут быть использованы для развития теории по увеличению срока службы дифференцированно упрочненных рельсов производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат».

Ключевые слова: трибометр, износ, износостойкость, рельсы, твердость, контактно-усталостные дефекты, трение, микроструктура, деформированная структура

Для цитирования: Олифиренко И.А., Осколкова Т.Н., Полевой Е.В. О результатах трибологических исследований железнодорожных рельсов. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(6):653–659. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-653-659>

ON THE RESULTS OF TRIBOLOGICAL STUDIES OF RAILWAY RAILS

I. A. Olifirenko^{1,2}, T. N. Oskolkova¹, E. V. Polevoi²

¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

² JSC EVRAZ United West Siberian Metallurgical Plant (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

✉ oskolkovatiana@yandex.ru

Abstract. Metal resistance to the formation of contact fatigue defects and wear development has a great influence on the consumer properties of rails. The most significant factors limiting the service life of rails in curved sections of the railway track are wear of rails of the outer threads and development of contact fatigue defects in the inner threads of the track. In this regard, methods of reliable laboratory assessment of the rail metal resistance become important in the development of new products. The paper describes the change in the nature of damage to rails of various hardness categories by contact fatigue defects, and evaluates their wear resistance. The study of defects and forecasting of the rail resource require an integrated approach. The paper provides a brief description of modeling the conditions of formation and accumulation of contact fatigue defects. The parameters under consideration have an effect on the wear resistance of rail metal of various chemical compositions. During the testing, the rails microstructure and the nature of crack growth change. The authors made a comparative analysis of the data obtained characterizing the wear resistance of rail steels of various hardness categories. The basis of the methodology for assessing the wear resistance of railway rails is the physical modeling of adhesion-deformation mechanism of friction of the samples on a roller friction machine (tribometer). During laboratory tests of the studied categories of rails, the friction machine automatically outputs and records a number of computational parameters shown in the work. The conducted research is promising

from a practical point of view. The results obtained can be used to develop a theory to increase the service life of differentially hardened rails produced by JSC EVRAZ United West Siberian Metallurgical Plant.

Keywords: tribometer, wear, wear resistance, rails, hardness, defects, friction, microstructure, deformed structure

For citation: Olifirenko I.A., Oskolkova T.N., Polevoi E.V. On the results of tribological studies of railway rails. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(6):653–659. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-653-659>

ВВЕДЕНИЕ

По требованиям ГОСТ Р 51685 качество рельсового металла оценивается рядом механических свойств (предел текучести (σ_T), временное сопротивление разрыву (σ_B), относительное удлинение (δ_5), относительное сужение (φ), ударная вязкость, твердость на поверхности катания и по сечению, уровень остаточных напряжений), а также соответствием металлопроката требованиям по микро- и макроструктуре, загрязненности неметаллическими включениями, качеству поверхности, прямолинейности и др. Все вышеперечисленное влияет на эксплуатационные свойства рельсов, однако один и тот же комплекс свойств может быть достигнут различными путями (легированием, термической обработкой, энергосиловыми и температурно-временными режимами прокатки). При разных видах обработки реализуются различные механизмы упрочнения и формирования структуры, непосредственно влияющие на стойкость к образованию и развитию дефектов контактной усталости и на износостойкость. Особенно сильно эти различия проявляются при эксплуатации рельсов в кривых участках железнодорожного пути. Рельсы наружной нити кривых участков пути интенсивно изнашиваются под действием боковых сил от гребня колес подвижного состава, где боковая сила обусловлена ориентацией между вращающимися колесами и касательной к рельсам кривой [1 – 3].

Длительное время основной характеристикой износостойкости стали считалась твердость. Исследования последних лет [4; 5] показывают, что природа изнашивания значительно более сложная и износостойкость не может оцениваться только твердостью. На абразивный износ влияют твердость, прочность и пластичность стали. Также стоит отметить, что износостойкость, помимо твердости, зависит от химического состава, особенностей технологии производства рельсов и их микроструктуры [6 – 8].

В связи с развитием тяжеловесного движения и общей тенденцией роста грузонапряженности [9] проблемы износа рельсов в кривых участках пути и образования контактно-усталостных дефектов приобретают большую актуальность, что нашло отражение в исследованиях [10 – 15], посвященных определению механизмов образования и развития дефектов контактной усталости и структуры в процессе эксплуатации. Другим направлением исследований данной проблематики является оценка потребительских свойств непосредственно в пути [16 – 21] или с применением

специализированных стендов [22; 23], в которых моделируют взаимодействие пары колесо – рельс в полном масштабе. На установке колесо – рельс с большой точностью можно оценить качественные характеристики износостойкости, поскольку рельс испытывается как цельная конструкция и учитываются неравномерность структуры и свойств по сечению, что отражает его работу на различных этапах жизненного цикла. При этом существенными недостатками непосредственных измерений в пути являются высокая степень влияния собственно условий эксплуатации при полигонных испытаниях, а также большая длительность как полигонных (~2,0 – 2,5 года), так и лабораторных стендовых (0,5 – 1,0 год) испытаний. Кроме того, испытательные стенды колесо – рельс – это дорогостоящее испытательное оборудование и в настоящее время в РФ отсутствует.

Таким образом, в настоящее время актуальной задачей при производстве рельсовой продукции является разработка и внедрение новых методов оценки в лабораторных условиях стойкости металла к образованию износа и контактно-усталостных дефектов. Такие методы позволят оценивать эффективность применяемых технологических решений и будут способствовать ускорению разработки востребованной продукции. Первоочередной задачей в области оценки износостойкости рельсов является поиск обоснованной методики, поскольку в настоящее время в научно-технической документации разработанная типовая методика отсутствует.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе в качестве объекта исследования использовали дифференцированно термоупрочненные рельсы типа Р65 составов 1 и 2 текущего производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») стали марки 76ХФ. Химический состав стали марки 76ХФ по ГОСТ Р 51685 – 2022 следующий, мас. %: С 0,71 – 0,84; Мн 0,75 – 1,25; Si 0,25 – 1,00; Р не менее 0,020; S не менее 0,020; Al не менее 0,004; Cr 0,20 – 0,60; V 0,03 – 0,15. Составы текущего производства отличаются по содержанию углерода и марганца: состав 1 – 0,76 % С, 0,79 % Мн; состав 2 – 0,81 % С, 0,97 % Мн.

Испытания образцов трением проводили на роликовой машине трения со следующими характеристиками: – нагрузка – до 5 кН;

- скорость вращения образцов – до 3000 об./мин;
- возможность проведения испытаний с лубрикантом и без него, с возможностью разогрева смазочных материалов до 100 °С.

Машина оснащена датчиками износа, вихретоковым датчиком, двумя датчиками вибрации, которые проводят измерения в трех плоскостях (x, y, z).

Испытания всех исследуемых образцов проводили при одинаковых режимах:

- нагрузка – 1,2 кН;
- скорость вращения рельсового ролика – 217 об./мин;
- коэффициент проскальзывания – ~10 %;
- время испытания – 120 мин;
- твердость контактного ролика – 59 HRC;
- смазочные материалы отсутствуют.

Также стоит отметить ряд вычислительных параметров, которые машина фиксирует в виде графиков: коэффициент трения, степень проскальзывания, сила трения, скорость проскальзывания и скорость подъема, зависимость скольжения от диаметра ролика (машина вычисляет параметры в соответствии с новыми вводными параметрами).

В работе изменяли скорость скольжения контактного ролика с целью удержания коэффициента (степени) проскальзывания 10 % в связи с изменением диаметра ролика в процессе трения.

Для проведения лабораторных испытаний с целью оценки износостойкости образцов из рельсов текущего производства составов 1 и 2 вырезали по одному образцу в соответствии с чертежом (рис. 1).

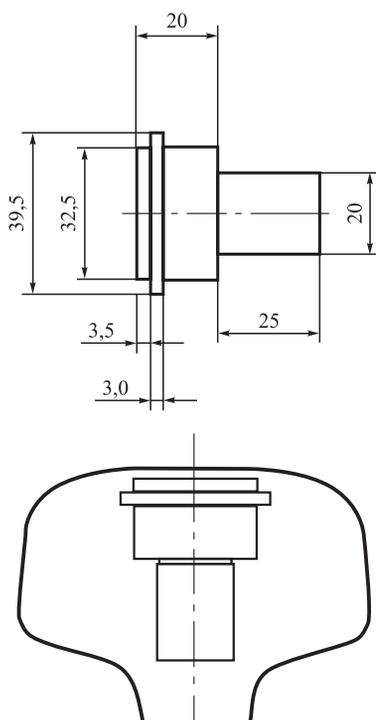


Рис. 1. Схема и место вырезки образцов

Fig. 1. Scheme and place of cutting samples

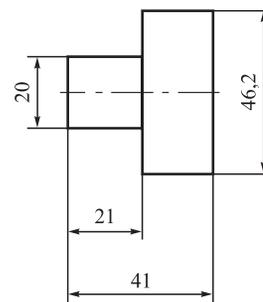


Рис. 2. Схема контактного образца

Fig. 2. Diagram of the contact sample

В качестве контактного образца использовали термоупрочненный ролик с твердостью $(59 \div 59) \pm 2$ HRC из стали марки 31Mn4 в соответствии с Европейским стандартом DIN 21544. Схема контактного образца представлена на рис. 2.

Оценка интенсивности износа рельсовых роликов проводилась с 52 000 до 156 000 оборотов с целью исключения влияния качества поверхности в начале испытаний и отслоения металла при последних циклах испытаний.

Износостойкость определялась как величина, обратная интенсивности износа (из-за малой потери массы при испытании использовались лабораторные аналитические весы с точностью до одной десятичной):

$$W = \frac{m_1 - m_2}{N_{\text{цикл}}} \cdot 10^{-5},$$

где W – износостойкость, г/цикл; m_1 и m_2 – масса образца до и после испытаний, г; $N_{\text{цикл}}$ – количество оборотов (1 цикл = 2600 об.).

К параметрам, влияющим на износостойкость рельсового металла, относится совокупность нескольких характеристик, которые позволяют оценивать и улучшать рельсовую сталь по износостойкости, а именно: твердость материала; химический состав (карбидообразующий углерод) и сера (определяет количество сульфидов марганца и железа, которые играют роль концентраторов напряжений в микроочагах разрушения при износе) [16]; параметры микроструктуры (межпластинчатое расстояние, диаметр зерна, размер перлитных колоний, объемная доля цементита); влияние карбидов и карбонитридов (их количество, форма и распределение) [4].

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Твердость металла исследуемых образцов измеряли методом Виккерса на микротвердомере «Qness Q10A+» по семи точкам по поверхности образца при нагрузке 50 Н, результаты измерений приведены в табл. 1.

Из представленных данных видно, что твердость образцов из рельсов состава 2 выше на 7,85 %.

Таблица 1. Результаты измерений твердости образцов

Table 1. Results of hardness measurements of the samples

Состав	Твердость, HV, в точках измерения						
	1	2	3	4	5	6	7
1	405	395	384	387	392	402	402
2	433	426	432	439	437	428	436

Микроструктуру металла рельсов исследовали на поперечных шлифах, изготовленных из зоны выкружки головки рельса после электрополировки и травления в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Исследуемая зона находилась на расстоянии 2–4 мм от поверхности катания головки рельса.

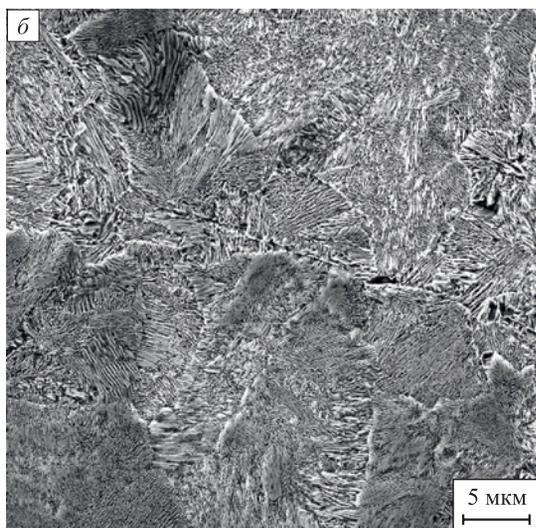
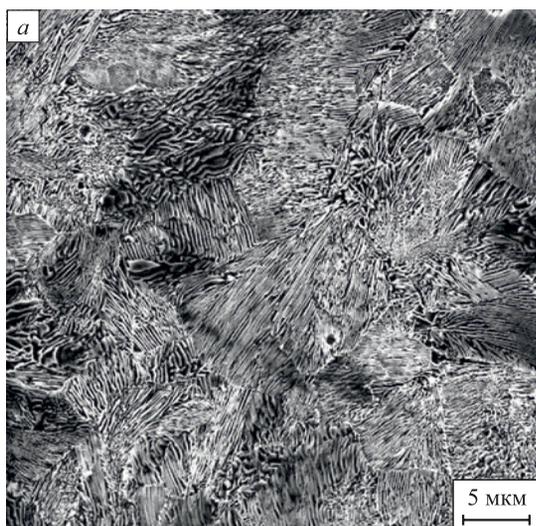


Рис. 3. Микроструктура металла рельсов состава 1 (а) и состава 2 (б)

Fig. 3. Microstructure of metal of the rails of composition 1 (a) and composition 2 (b)

Таблица 2. Параметры микроструктуры рельсов

Table 2. Parameters of the rail microstructure

Состав	Межпластинчатое расстояние, мкм	Диаметр зерна, мкм	Номер зерна
1	0,109	24,20	8
2	0,091	19,50	9

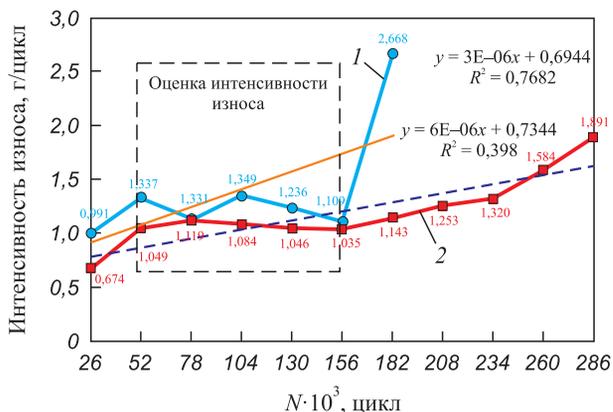


Рис. 4. Интенсивность износа рельсов состава 1 (●) и состава 2 (■)

Fig. 4. Wear rate of the rail samples of composition 1 (●) and composition 2 (■)

Результаты измерений представлены в табл. 2 и на рис. 3.

Из анализа полученных данных следует, что межпластинчатое расстояние в микроструктуре металла исследуемых рельсов состава 1 незначительно превышает значение, полученное для рельсов состава 2. При этом диаметр зерна в металле рельсов с пониженным содержанием углерода и марганца (состав 1) превышает диаметр зерна в металле рельсов состава 2 на 1,0 балл. Зерно образцов 1 и 2 соответствует значениям 24,20 мкм (8 номер) и 19,50 мкм (9 номер).

Средняя интенсивность износа образцов из рельсов состава 2 составила $1,0665 \cdot 10^{-5}$ г/цикл, что на 13,5 % ниже интенсивности износа, полученной в результате испытаний образцов из рельсов состава 1 со значением $1,2324 \cdot 10^{-5}$ г/цикл.

Необходимо отметить, что после 182 000 оборотов образцы, вырезанные из рельсов состава 1, показали резкую потерю массы (рис. 4).

Микроструктуру образцов после цикла испытаний трением изучали на оптическом инвертированном микроскопе Olympus JX71. Оценка микроструктуры показала наличие волокнисто-деформированной структуры с толщиной слоя до 82,4 мкм на образцах состава 2 и до 103,9 мкм на образцах состава 1 по краям образца (рис. 5, а, б), а также до 67,7 мкм на образцах состава 2 и до 77,6 мкм на образцах состава 1 по центральной части образца (рис. 5, в, г).

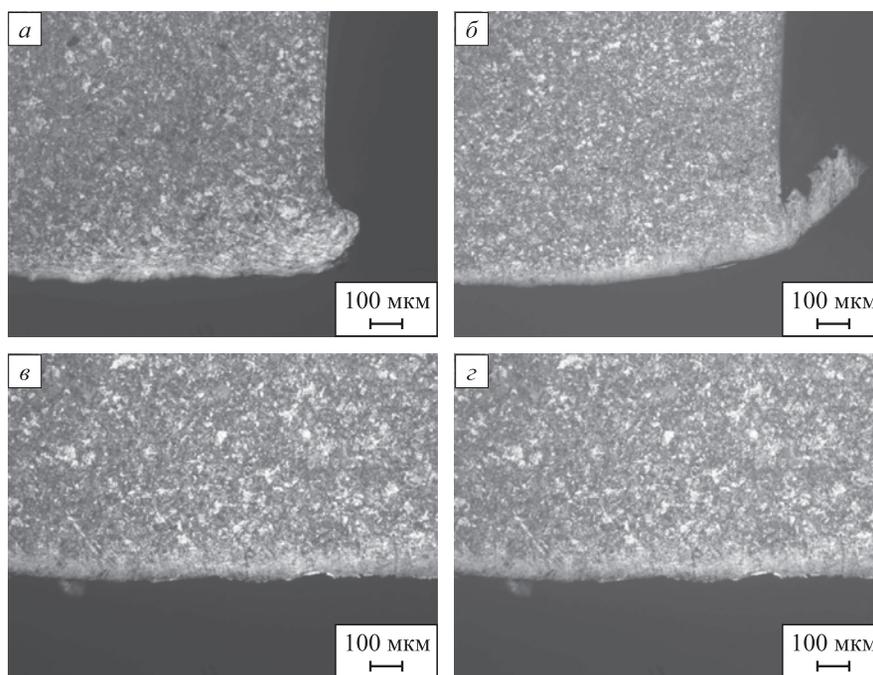


Рис. 5. Волокнисто-деформированная структура по краям образцов рельсов (а, б) и по центральной части образцов рельсов (в, з) состава 1 (а, в) и состава 2 (б, з)

Fig. 5. Fibrous-deformed structure along the edges of the rail samples (a, б) and along the central part of the rail samples (в, з) of composition 1 (a, в) and composition 2 (б, з)

Выводы

Повышение содержания углерода и марганца в рельсовой стали приводит к повышению износостойкости и стойкости к дефектам контактно-усталостного происхождения.

Научные результаты работы могут быть использованы для развития теории по увеличению срока службы рельсов, сокращению расходов на их текущее содержание и повышение надежности дифференцированно упрочненных рельсов производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Yokoyama H., Mitao S., Yamamoto S. Wear and rolling contact fatigue behavior in pearlitic and bainitic rail steels. In: *7th International Heavy Haul Conf.* Fukuyama, Japan: Materials & Processing Research Center; 2001:551–557.
2. Горячева И.Г., Шур Е.А., Борц А.И., Захаров С.М. Исследование механизмов повреждаемости рельсов нового поколения и моделирование их возникновения. *Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД.* 2017;(4):25–27.
Goryacheva I.G., Shur E.A., Bortz A.I., Zakharov S.M. New generation rails damageability mechanisms evaluation and damage occurrence design. *Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways.* 2017;(4):25–27. (In Russ.).
3. Горячева И.Г., Захаров С.М., Коган А.Я., Торская Е.В., Шур Е.А., Абдурашитов А.Ю., Борц А.И., Заграничек К.Л. Комплексный подход к прогнозированию работоспособности и ресурса рельсов нового поколения. *Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД.* 2017;(5-6):16–26.
Goryacheva I.G., Zakharov S.M., Kogan A.Ya., Torskaya E.V., Shur E.A., Abdurashitov A.Yu., Borts A.I., Zagranichkek K.L. Complex approach to forecasting the operability and resource of new generation rails. *Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways.* 2017;(5-6): 16–26. (In Russ.).
4. Полевой Е.В., Юнин Г.Н., Юнусов А.М., Добужская А.Б., Галицын Г.А. К вопросу об износостойкости рельсов. *Сталь.* 2019;(7):62–65.
Polevoy E.V., Yunin G.N., Yunusov A.M., Dobuzhskaya A.B., Golitsyn G.A. On the issue of wear resistance of rails. *Stal'.* 2019;(7):62–65. (In Russ.).
5. Jendel T. Prediction of wheel profile wear – comparisons with field measurements. *Wear.* 2002;253(1-2):89–99.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00087-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00087-X)
6. Заграничек К.Л., Борц А.И., Перков И.Е. Сравнительная оценка сопротивления износу дифференцированно термоупрочненных рельсов общего и специального назначения в лабораторных условиях. В кн.: *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений. Сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 26–27 сентября 2019 г.).* Екатеринбург: УИМ; 2020:94–114. (In Russ.).
7. Shur E.A., Borts A.I., Bazanova L.V. Fatigue life of damaged rails. *Journal of Physics: Conference Series.* 2020;1431(1):012071.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1431/1/012071>

8. Совершенствование рельсовых сталей. *Железные дороги мира*. 2016;(1):74–76.
Improvement of rail steels. *Zheleznye dorogi mira*. 2016;(1):74–76. (In Russ.).
9. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения: управление содержанием системы колесо – рельс / Пер. с англ. под ред. С.М. Захарова. Москва: Интекст; 2017:420.
10. Dang Van, Maitournam M.H., Moumni Z., Roger F. A comprehensive approach for modeling fatigue and fracture of rails. *Engineering Fracture Mechanics*. 2009;76(17):2626–2636. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.12.020>
11. Goryacheva I.G., Zakharov S.M., Torskaya E.V. Rolling contact fatigue and wear of wheel/rail simulation. In: *Proceedings of the Second Int. Conf. on Railway Technology Research Development and Maintenance*. Stirlingshire, Scotland: Civil-Comp Press; 2014:0123456789.
12. Kabo E., Ekberg A. Prediction of RCF from laboratory tests. In: *INNOTRACK Concluding Technical Report*. 2010:131–133.
13. Rodríguez-Arana B., Emeterio A.S., Panera M., Montes A., Alvarez D. Investigation of a relationship between twin-disc wear rates and the slipping contact area on R260 grade rail. *Tribology International*. 2022;168:107456. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107456>
14. Кузнецов Р.В., Громов В.Е., Полевой Е.В., Рубаникова Ю.А., Кормышев В.Е. Эволюция структурно-фазовых состояний и свойств дифференциально закаленных 100-метровых рельсов при экстремально длительной эксплуатации. Сообщение 3. Структура и свойства рельсов после пропущенного тоннажа 1,77 млрд т брутто. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2021;(2):81–87.
Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Polevoy E.V., Rubanikova Yu.A., Kormyshev V.E. Evolution of structural-phase states and properties of differentially hardened 100-meter rails during extremely long-term operation. Message 3. Structure and properties of rails after the transported tonnage of 1.77 billion tons. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2021;(2):81–87. (In Russ.).
15. Pacey M.N., James M.N., Patterson E.A. A new photoelastic model studying fatigue cracks closure. *Experimental Mechanics*. 2005;45(1):42–45. <https://doi.org/10.1007/BF02428989>
16. Шур Е.А., Цвигун В.Н., Койнов Р.С. Модели образования фактографических рельефов на усталостных трещинах. *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2018;(40):118–135.
Shur E.A., Tsvigun V.N., Koinov R.S. Models of formation of factographic reliefs on fatigue cracks. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sekcii Rossiiskoi akademii nauk. Otdelenie metallurgii*. 2018;(40):118–135. (In Russ.).
17. Горячева И.Г., Борц А.И., Захаров С.М., Заграничек К.Л., Шур Е.А. Исследование и моделирование возникновения поверхностных контактно-усталостных повреждений в рельсах. В кн.: *Трибология – машиностроению. Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН*. 2018:146–149.
18. Некрасов Д.Б., Палагин С.В., Лыков К.Ю. О расширении полигонов и совершенствовании методик мониторинга и испытаний рельсов. *Путь и путевое хозяйство*. 2023;(4):29–31.
Nekrasov D.B., Palagin S.V., Lykov K.Yu. On the expansion of landfills and the improvement of methods for monitoring and testing rails. *Railway Track and Facilities*. 2023;(4):29–31. (In Russ.).
19. Шур Е.А. Как правильно сравнивать износостойкость различных рельсов. *ПСИ-эксперт*. 2018;(1-2):20–25.
Shur E.A. How to compare the wear resistance of different rails correctly. *RSP Expert*. 2018;(1-2):20–25. (In Russ.).
20. Некрасов Д.Б., Борц А.И., Бехер С.А., Бобров А.Л., Палагин С.В., Шляхтенков С.П. Обеспечение эффективности шлифования на основе диагностики преддефектных состояний. *Путь и путевое хозяйство*. 2024;(3):17–19.
Nekrasov D.B., Borts A.I., Becher S.A., Bobrov A.L., Palagin S.V., Shlyakhtenko S.P. Ensuring the effectiveness of grinding based on the diagnosis of pre-defective conditions. *Railway Track and Facilities*. 2024;(3):17–19. (In Russ.).
21. Некрасов Д.Б., Палагин С.В., Лыков К.Ю. Результаты испытаний рельсов категории ДТ400ИК. *Путь и путевое хозяйство*. 2023;(2):20–22.
Nekrasov D.B., Palagin S.V., Lykov K.Yu. Test results of rails of the DT400IK category. *Railway Track and Facilities*. 2023;(2):20–22. (In Russ.).
22. Burstow M. A whole life rail model application and development for RSSB – Continued development of an RCF damage parameter. London: Rail Safety and Standards Board; 2004:74.
23. Chen Y.-T., Liu D.-Y., Fang H.-S., Bai B.-Z. Rolling contact fatigue of rail steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2000;12(5):50–53.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Иван Андреевич Олифиренко, главный специалист по физическим методам исследования дирекции по рельсовому производству научно-производственного центра, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»; аспирант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: Ivan.Olifirenko@evraz.com

Татьяна Николаевна Осколкова, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-1310-1284

E-mail: oskolkovatiana@yandex.ru

Ivan A. Olifirenko, Chief Specialist in Physical Research Methods, Directorate for Rail Production of the Research and Production Center, JSC EVRAZ United West Siberian Metallurgical Plant; Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

E-mail: Ivan.Olifirenko@evraz.com

Tat'yana N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-1310-1284

E-mail: oskolkovatiana@yandex.ru

Егор Владимирович Полевой, к.т.н., начальник бюро металловедения и термической обработки технического отдела рельсовой площадки, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

E-mail: egor.polevoj@evraz.com

Egor V. Polevoi, Cand. Sci. (Eng.), Head of Bureau of Metal Science and Heat Treatment of Technical Department of the Rail Site, JSC EVRAZ United West Siberian Metallurgical Plant

E-mail: egor.polevoj@evraz.com

Вклад авторов

Contribution of the Authors

И. А. Олифиренко – постановка задачи и цели исследований, проведение трибологических и механических испытаний, написание текста статьи, проведение исследований образцов методами сканирующей электронной микроскопии, обсуждение и анализ результатов.

Т. Н. Осолкова – постановка задачи и цели исследований, обсуждение и анализ результатов.

Е. В. Полевой – анализ и обобщение результатов исследования.

I. A. Olifirenko – setting the task and goals of research, conducting tribological and mechanical tests, writing the text, conducting studies of samples using scanning electron microscopy, discussion and analysis of the results.

T. N. Oskolkova – setting the task and goals of research, discussion and analysis of the results.

E. V. Polevoi – analysis and summarizing of the results.

Поступила в редакцию 25.04.2024

После доработки 05.06.2024

Принята к публикации 17.09.2024

Received 25.04.2024

Revised 05.06.2024

Accepted 17.09.2024