

И.Н. Терентьев¹

¹ Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Российская Федерация

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ПЛЕТЕЙ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ ИЗ ОБЪЕМНО И ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ РЕЛЬСОВ

Аннотация. Статья посвящена проблеме надежности рельсовых плетей в процессе их эксплуатационной работы. В данной статье выполнен сравнительный анализ надежности плетей бесстыкового пути из объемно термоупрочненных и дифференцированно термоупрочненных рельсов. В результате анализа, выявлен в последние годы резкий всплеск дефектности рельсовых плетей. Это связано с тем, что более 50 % бесстыкового пути эксплуатируется с рельсовыми плетями с пропущенным тоннажем более 700 млн т брутто, в т.ч. 14 % с пропущенным тоннажем более 1100 млн т брутто. Средняя наработка до отказа для рельсов категории Т1 составила 819,9 млн т брутто, для рельсов ДТ350 – 780,9 млн т брутто. Большинство отказов возникает в головке рельсов (Т1 – 99 %, ДТ350 – 98 %). Доля дефектов 1 группы – трещины и выкрашивание на поверхности головки рельса в рельсах Т1 составляет 11 %, у ДТ350 – 15 %. Наибольшую долю (более 80 % у обеих категорий рельсов) занимают отказы рельсов по дефектам 4 группы (дефекты 46.3 и 46.4) – износ и смятие головки в зоне сварных стыков (после пропуска гарантийного тоннажа). Необходимо обеспечить внедрение усовершенствованных скоростных технологий профильной шлифовки и фрезерования рельсов в пути и в стационарных условиях, а также других технологий повышения износостойкости и ресурса рельс, сварочных машин и индукционных установок для термической обработки сварных стыков в рельсосварочном производстве.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельсы, дефекты, надежность.

I.N. Terentyev¹

¹ Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE continuous welded rails RELIABILITY FROM VOLUME AND DIFFERENTIALLY HEAT-STRENGTHENED RAILS

Abstract. The article is devoted to the problem of the reliability of rail lashes in the process of their operational work. In this article, a comparative analysis of the reliability of the lashes of a seamless track from volumetrically heat-strengthened and differentially heat-strengthened rails is carried out. As a result of the analysis, a sharp surge in the defectiveness of rail lashes has been revealed in recent years. This is due to the fact that more than 50% of the seamless track is operated with rail lashes with a tonnage of more than 700 million gross tons, incl. 14% with over 1,100 million gross tons of missed tonnage. Average time to failure for category T1 rails was 819.9 million gross tons, for rails DT350 – 780.9 million gross tons. Most failures occur in the rail head (T1 - 99%, DT350 - 98%). The share of defects of the 1st group - cracks and chipping on the surface of the rail head in T1 rails is 11%, in DT350 - 15%. The largest share (more than 80% for both categories of rails) is occupied by rail failures due to group 4 defects (defects 46.3 and 46.4) - wear and collapse of the head in the area of welded joints (after the warranty tonnage was missed). It is necessary to ensure the introduction of improved high-speed technologies for profile grinding and milling of rails on the road and in stationary conditions, as well as other technologies for increasing the wear resistance and service life of rails, welding machines and induction installations for heat treatment of welded joints in rail welding production.

Keywords: railway track, rails, defects, reliability.

Введение

Бесстыковой путь является наиболее прогрессивной конструкцией верхнего строения железнодорожного пути. На зарубежных железных дорогах и сети железных дорог Российской Федерации такая конструкция получила широкое распространение благодаря своим технико-экономическим преимуществам [1]. Полигон бесстыкового пути на сети железных дорог ОАО «РЖД» на протяжении нескольких десятилетий увеличивается и продолжит далее ежегодно расширяться до 3,5 тыс. км в год [2].

Увеличение полигона бесстыкового пути сопровождается комплексом мер, направленных на повышение эксплуатационной надежности и функциональной

безопасности элементов железнодорожного пути [3–5]. Значимое место в конструкции верхнего строения пути занимают рельсовые плети, отказы в которых существенно влияют на безопасность и бесперебойность перевозочного процесса [6,7]. Современные же условия работы железнодорожного транспорта требуют повышения надежности, минимизации затрат на приобретение и эксплуатацию технических средств. Оптимизация срока их службы [8], расходов по текущему содержанию и замене [9,10] является ключевой составляющей, определяющей повышение эффективности и работоспособности инфраструктуры [11].

Методы и материалы

Данные условия свидетельствуют о необходимости управления техническим состоянием и продления срока службы эксплуатируемых рельсовых плетей в дистанциях пути [12]. Базой для этого служат данные об отказах, техническая документация путевого хозяйства, а также результаты диагностики и комиссионных осмотров. Целью работы является сравнительный анализ надежности существующих эксплуатируемых плетей бесстыкового пути из объемно и термоупрочненных рельсов.

Важным показателем надежности, с помощью которого оценивается безотказность рельсов, является средняя наработка до первого отказа (математическое ожидание наработки до первого отказа) [13], определяемая по формуле (1):

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^k \frac{t_i n_i}{N_0}, \quad (1)$$

где k – число интервалов;

t_i - значение середины интервала, млн т брутто;

n_i - число отказов в интервале, шт.;

N_0 – сумма рассматриваемых объектов, шт.

По мере увеличения наработки возрастает число отказавших рельсов и убывает соответственно число работоспособных. Накопленное число отказов $r(t_i)$ и соответственно число оставшихся работоспособными рельсов $N(t_i)$ определяются по следующим формулам:

$$r(t_i) = \sum_{i=1}^k n_i; \quad (2)$$

$$N(t_i) = N_0 - r(t_i). \quad (3)$$

Обобщенное представление о надежности дают не абсолютные, а относительные (удельные) значения полученных данных.

Вместо выражения в абсолютных единицах накопленного числа работоспособных к данному моменту наработки t_i изделий $N(t_i)$ целесообразно использовать отношение (4)

$$\bar{P}(t_i) = \frac{N(t_i)}{N_0}. \quad (4)$$

Это выражение характеризует на момент t_i наработки долю работоспособных изделий по отношению к находящимся под наблюдением (накопленная частота безотказной работы).

Аналогично соответствующая доля отказавших изделий (накопленная частота отказов) определится из отношения (5)

$$\bar{F}(t_i) = \frac{r(t_i)}{N_0}. \quad (5)$$

Для анализа выбран полигон Б дистанции пути К дирекции инфраструктуры. Для выборки принимались плети из рельсов категории Т1 (объемно термоупрочненные рельсы) и ДТ350 (дифференцированно термоупрочненные по поперечному сечению рельсы) [14,15], эксплуатируемые на главных путях направления Н – К.

Результаты

На основе анализа данных с дистанции пути о дефектах, выявленных в рельсовых плетях с 2018 по 2022 гг. получен график, показывающий динамику отказов по I и II главному пути (рис. 1).

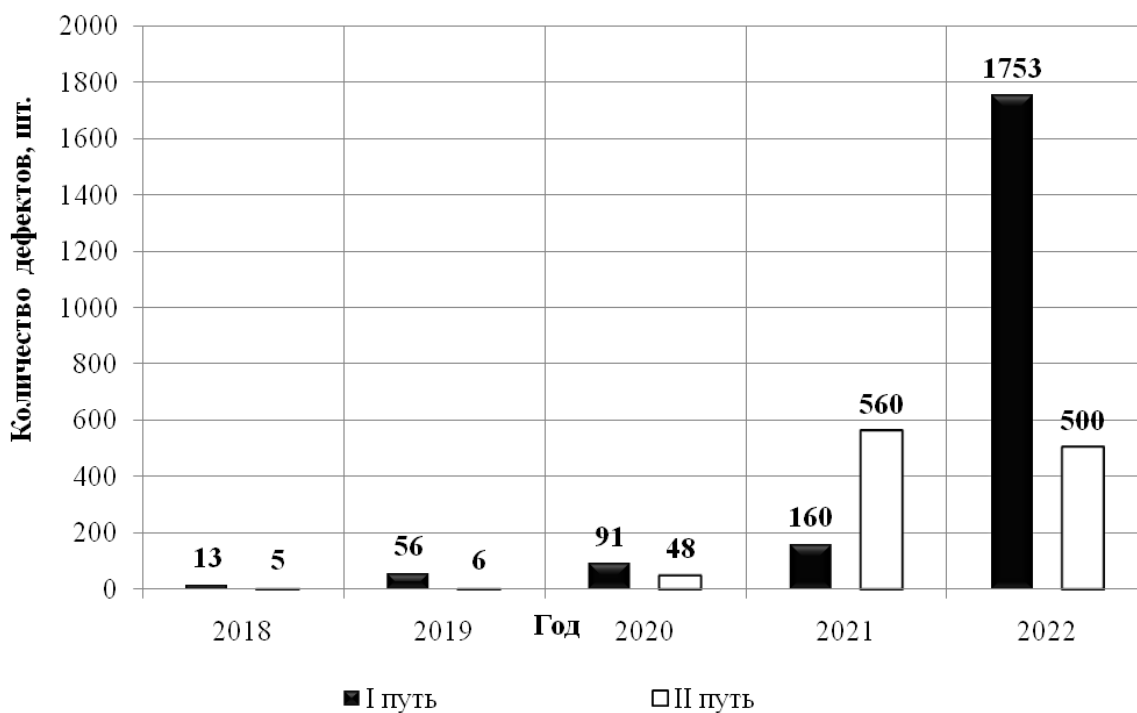


Рис. 1. Количество выявленных дефектов в рельсовых плетях по годам

Для определения средней наработки до отказа рельсовых плетей из рельсов категории Т1 и ДТ350 была построена гистограмма распределения наработки до отказа (см. рис. 2).

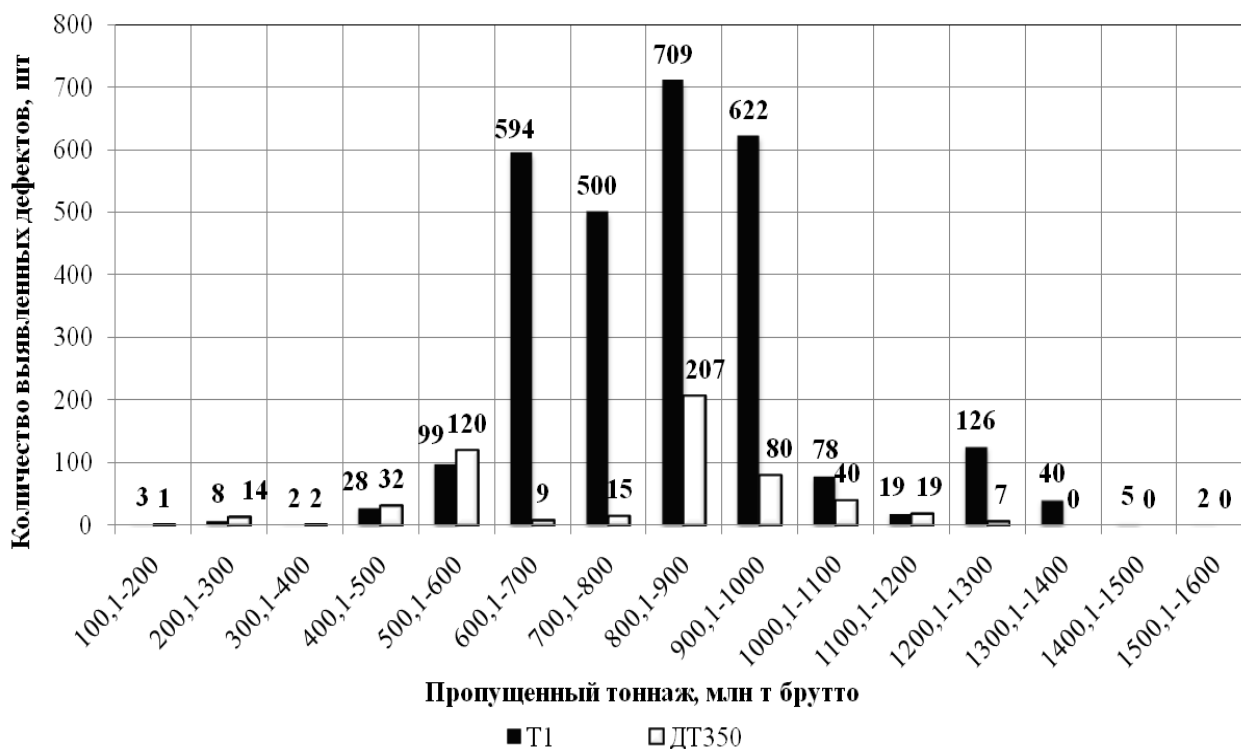


Рис. 2. Нарботка до отказа рельсовых плетей за 2018-2022 гг.

На рисунке 3 изображен график вероятности отказов и вероятности безотказной работы рельсовых плетей. Кроме того, для понимания характера отказов в рельсовых плетях выполнен общий анализ структуры распределения дефектов в них (см. рис. 4)

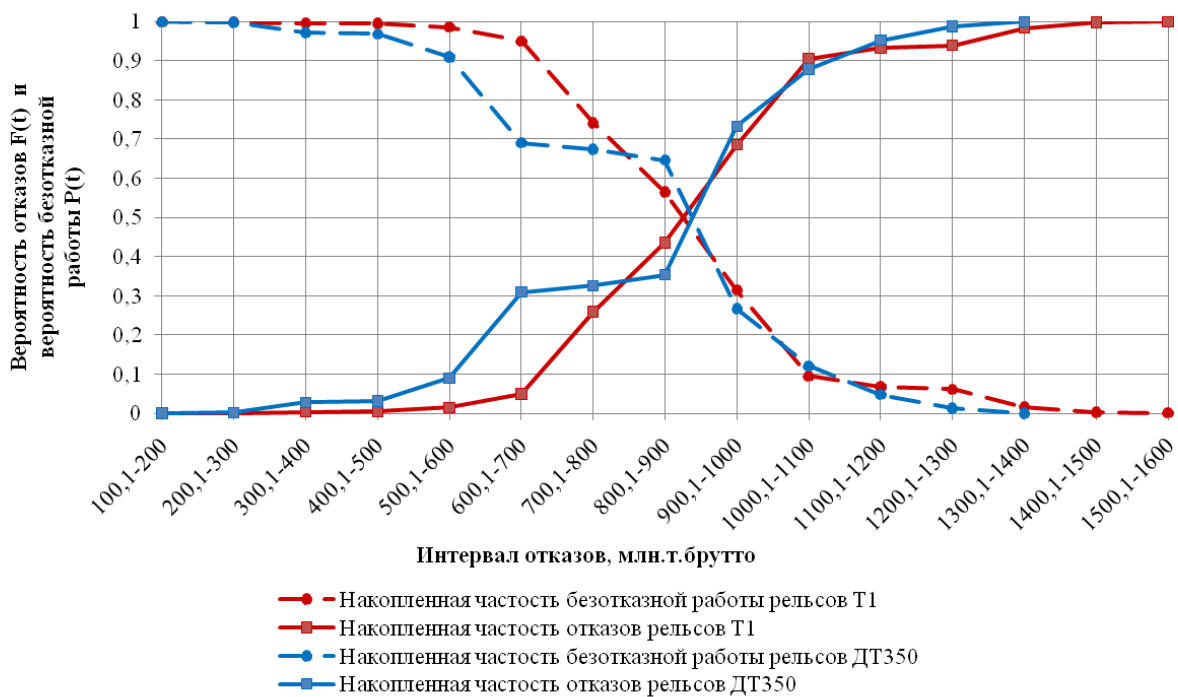


Рис. 3. Вероятность отказов $F(t)$ и вероятность безотказной работы $P(t)$ рельсовых плетей

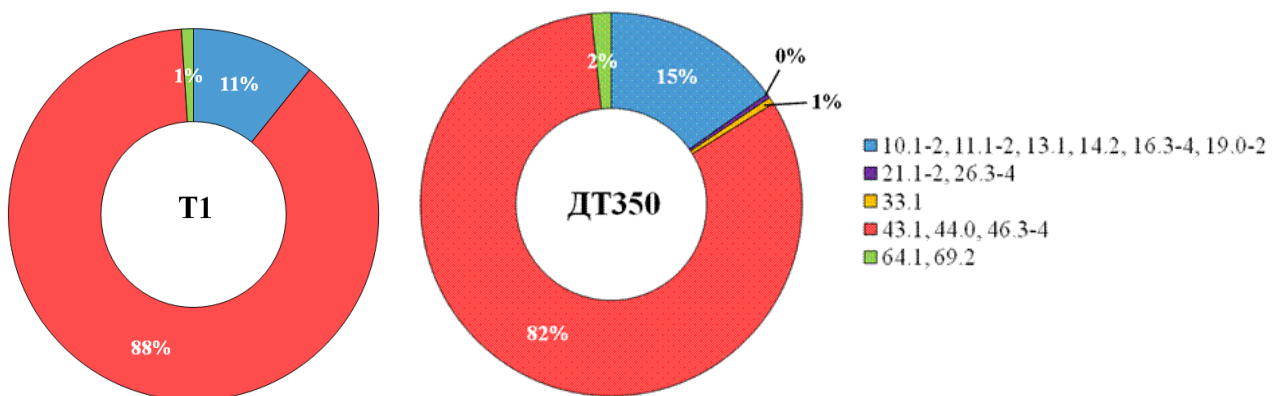


Рис. 4. Структура распределения дефектов в плетях из рельсов категории Т1 и ДТ350

Обсуждение

Из полученных в ходе анализа данных о количестве дефектов в рельсовых плетях с 2018 по 2022 г. (рис. 1) видно, что количество отказов по I главному пути многократно превышает количество таких отказов по II пути (исключение 2021 г.). При том, что грузонапряженность по I пути (78,1 млн т брутто/км в год) на 40 % ниже, чем по II пути (111,2 млн т брутто/км в год). В 2021-2022 годах отмечается резкий всплеск дефектности рельсовых плетей. Известно, что основной причиной отказов рельсов являются дефекты, зависящие от пропущенного тоннажа [16]. Так на Б дистанции пути более 50 % бесстыкового пути эксплуатируется с рельсовыми плетями с пропущенным тоннажем более 700 млн т брутто, в т.ч. 14 % с пропущенным тоннажем более 1100 млн т брутто.

По результат построения графика распределения наработки плетей из рельсов категории Т1 и ДТ350 (рис. 2) видно, что у рельсов категории Т1 наблюдается всплеск интенсивности отказов в диапазоне 600-1000 млн т брутто. У рельсов категории ДТ350 менее выраженные всплески отказов при пропущенных тоннажах 500-600 и 800-900 млн т брутто. Данные интервалы наработки тоннажа, показывающие увеличение отказов также хорошо видны на графике вероятности отказов и безотказной работы рельсовых плетей (рис. 3). По

полученным данным средняя наработка до отказа для рельсов категории Т1 составила $\overline{T_{cp}} = 819,9$ млн т брутто, для рельсов ДТ350 – $\overline{T_{cp}} = 780,9$ млн т брутто.

В результате оценки выполнен общий анализ структуры распределения дефектов в рельсовых плетях (см. рис. 4). Из полученных данных видно, что большинство отказов возникает в головке рельсов (Т1 – 99 %, ДТ350 – 98 %). Доля дефектов 1 группы – трещины и выкрашивание на поверхности головки рельса в рельсах Т1 составляет 11 %, у ДТ350 – 15 %. Наибольшую долю (более 80 %) занимают отказы рельсов по дефектам 4 группы (дефекты 46.3 и 46.4) – износ и смятие головки в зоне сварных стыков (после пропуска гарантийного тоннажа). У рельсов категории Т1 данный дефект составляет 85 % в общей структуре дефектности, у рельсов ДТ350 – 81 %.

Дефектные коды 46.3-4 образуются в следствие неоднородности механических свойств металла, получающегося при сварке рельсов, образуется местное одиночное (одна седловина) или двойное (две седловины) смятие головки рельса. Интенсивному развитию седловин в эксплуатации способствуют наличие начальной неровности в сварном стыке, образовавшейся при сварке рельсов с концевой искривленностью, отсутствие или нарушение упрочняющей термической обработки сварных стыков [17]. Для уменьшения уклонов неровностей на поверхности катания головки в зоне сварного стыка необходимо производить местное шлифование рельса. До полного или частичного устранения неровностей необходима шлифовка рельсов по всей длине рельсошлифовальными поездами или выполнение работ по временному и окончательному восстановлению целостности рельсовой плети.

Заключение

В целях повышения ресурса рельсов необходимо обеспечить развитие научных исследований по разработке рекомендаций по снижению повреждаемости рельсов, математическому моделированию и верификации развития дефектов, созданию прогнозной модели достижения предельно допустимых значений дефектности и определения остаточного ресурса рельсов в различных условиях эксплуатации, оптимизации периодичности неразрушающего контроля рельсов с учетом их дефектности и оценки остаточного ресурса в различных условиях эксплуатации, разработке технических средств контроля рельс по всему сечению при сплошном контроле, внедрению перспективных методов неразрушающего контроля рельсов [18].

Кроме того, необходимо обеспечить внедрение усовершенствованных скоростных технологий профильной шлифовки и фрезерования рельсов в пути и в стационарных условиях, а также других технологий повышения износостойкости и ресурса рельс, сварочных машин и индукционных установок для термической обработки сварных стыков в рельсосварочном производстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Совершенствование технологического обслуживания бесстыкового пути / С. А. Косенко [и др.] // Транспорт Урала. 2016. № 2(49). С. 44–47.
2. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года: Распоряжением ОАО «РЖД» от 15.12.2011 № 2718р. URL: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf.
3. Косенко С.А., Котова И.А., Акимов С.С. Техничко-экономическое обоснование устройства защитных подбалластных слоев из грунтобетона при тяжеловесном движении поездов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 1. С. 161–174.
4. Akimov S., Kosenko S. Stress state of roadbed reinforced with soil-concrete layer under the impact of heavy-tonnage trains // Transportation Research Procedia. 2021. № 54. С. 495–502.
5. Косенко С.А., Акимов С.С. Юдин О.Г. Повышение несущей способности грунтов основной площадки // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 2 (12). С. 37–43.
6. Косенко С.А., Акимов С.С. Причины отказов элементов железнодорожного пути на

полигоне Западно-Сибирской железной дороги // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3 (42). С. 26–34.

7. Севостьянов А.А., Величко Д.В. Основные причины отказов рельсов в процессе эксплуатации // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 51–54.

8. Косеко С.А. Акимов С.С. Богданович С.В. Соколовский И.К. Оценка стоимости жизненного цикла верхнего строения пути при продлении межремонтного периода // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1 (56). С. 71–78.

9. Способ замены зажатых уравнильных рельсов и рельсов временного восстановления плети бесстыкового пути (варианты): пат. РФ. № 2643324 / А.С. Шуругин [и др.]; заяв. и патентообл. ОАО «РЖД». – № 2016135672; заявл. 02.09.16; опубл. 31.01.18, Бюл. № 4. – 2.

10. Метод смены температурно зажатых уравнильных рельсов бесстыкового пути / С.А. Косенко [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3(47). С. 187–190.

11. Косенко С.А., Акимов С.С., Бондарь И.С., Бондарь И.С. Оценка эксплуатационной надежности рельсовых плетей // Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2022): сборник трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 марта 2022 г. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022. С. 167–174.

12. Косенко С.А., Акимов С.С. Богданович С.В., Соколовский И.К. Оценка стоимости жизненного цикла верхнего строения пути для различных ремонтных схем и промежуточных рельсовых скреплений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 2 (53). С. 92–100.

13. Базанов А.С., Акимов С.С. Оценка надежности стрелочного хозяйства дистанции пути Алтайского региона инфраструктуры // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 37–43.

14. Kosenko S.A., Akimov S.S.: Performance characteristics of differentially quenched rails // Mag. Civ. Eng. 2017. T. 7 (75). С. 94–105.

15. Соколов О.М., Косенко С.А., Акимов С.С. Мониторинг эксплуатационной работы дифференцированно термоупрочненных рельсов на Западно-Сибирской железной дороге // Транспортная инфраструктура Сибирского региона материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. Иркутск изд-во ИрГУПС. 2017. С. 473–478.

16. Величко Д.В., Севостьянов А.А. Антерейкин Е.С. Оценка надежности рельсов на участках Транссибирской магистрали // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 1 (48). С. 5–11.

17. Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefekтных рельсов : утв. распоряжением ОАО «РЖД» 23.10.14 № 2499р. Москва. 140 с.

18. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : Распоряжение ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р. Режим доступа: <https://www.irgups.ru>.

REFERENCES

1. Sovershenstvovaniye tekhnologicheskogo obsluzhivaniya besstykovogo puti [Improvement of the process maintenance of continuous welded rails] / S. A. Kosenko [i dr.] // *Transport Urala* [*Transport of the Urals*]. 2016. No 2(49). pp. 44–47.

2. Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiyskiye zheleznyye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda [The energy strategy of the Russian Railways holding for the period up to 2015 and for the future up to 2030]: Rasporyazheniyem ОАО «RZHD» ot 15.12.2011 No 2718r. URL: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf.

3. Kosenko S.A., Kotova I.A., Akimov S.S. Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye ustroystva zashchitnykh podballastnykh slojev iz gruntobetona pri tyazhelovesnom dvizhenii poyezdov [Feasibility studies of protective sub-ballast soil-cement layers at heavy-train traffic] //

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Journal of Construction and Architecture]. 2021. T. 23. No 1. pp. 161–174.

4. Akimov S., Kosenko S. Stress state of roadbed reinforced with soil-concrete layer under the impact of heavy-tonnage trains // *Transportation Research Procedia*. 2021. № 54. S. 495–502.

5. Kosenko S.A., Akimov S.S. Yudin O.G. Povysheniye nesushchey sposobnosti gruntov osnovnoy ploshchadki [Increasing the soil capacity of the subgrade surface] // *Put' i putevoye khozyaystvo [Railway Track and Facilities]*. 2022. No 2 (12). pp. 37–43.

6. Kosenko S.A., Akimov S.S. Prichiny otkazov elementov zheleznodorozhnogo puti na poligone Zapadno-Sibirskoy zheleznoy dorogi [Failure causes of railway track elements at the West-Siberian railway polygon] // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [The Siberian Transport University Bulletin]*. 2017. No 3 (42). pp. 26–34.

7. Sevost'yanov A.A., Velichko D.V. Osnovnyye prichiny otkazov rel'sov v protsesse ekspluatatsii [Main causes of rail breakdowns in the operation process] // *Transport Urala [Transport of the Urals]*. 2017. № 2 (53). pp. 51–54.

8. Koseko S.A. Akimov S.S. Bogdanovich S.V. Sokolovskiy I.K. Otsenka stoimosti zhiznennogo tsikla verkhnego stroyeniya puti pri prodlenii mezhremontnogo perioda [Life cycle estimation of the permanent way when extending the overhaul period] // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [The Siberian Transport University Bulletin]*. 2021. No 1 (56). pp. 71–78.

9. Sposob zameny zazhatykh uravnitel'nykh rel'sov i rel'sov vremennogo vosstanovleniya pleti besstykovogo puti (varianty) [A method for replacing clamped leveling rails and rails for temporary restoration of a lash of a seamless track (options)]: pat. RF. № 2643324 / A.S. Shurugin [i dr.]; zayav. i patentoobl. OAO «RZHD». – No 2016135672; zayavl. 02.09.16; opubl. 31.01.18, Byul. No 4. 2 p.

10. Metod smeny temperaturno zazhatykh uravnitel'nykh rel'sov besstykovogo puti [Method of changing the temperature clamped equalizing on continuous welded rail] / S.A. Kosenko [i dr.] // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*. 2015. No 3(47). pp. 187–190.

11. Kosenko S.A., Akimov S.S., Bondar' I.S., Bondar' I.S. Otsenka ekspluatatsionnoy nadezhnosti rel'sovykh pletey // *Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy na transporte (UERT-2022) [Assessment of the operational reliability of rail lashes // Management of operational work in transport (UERT-2022)]*: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakti- cheskoj konferentsii, Sankt-Peterburg, 15–16 marta 2022 g. Sankt-Peterburg: FGBOU VO PGUPS, 2022. pp. 167–174.

12. Kosenko S.A., Akimov S.S. Bogdanovich S.V., Sokolovskiy I.K. Otsenka stoimosti zhiznennogo tsikla verkhnego stroyeniya puti dlya razlichnykh remontnykh skhem i promezhutochnykh rel'sovykh skrepleniy [Life cycle estimation of the permanent for various repair schemes and rail fastenings] // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [The Siberian Transport University Bulletin]*. 2020. No 2 (53). pp. 92–100.

13. Bazanov A.S., Akimov S.S. Otsenka nadezhnosti strelochnogo khozyaystva distantsii puti Altayskogo regiona infrastruktury [The switch equipment reliability assessment of the permanent way division of the Altay region infrastructure] // *Molodaya nauka Sibiri [Young Science of Siberia]*. 2021. № 2 (12). pp. 37–43.

14. Kosenko S.A., Akimov S.S.: Performance characteristics of differentially quenched rails // *Magazine of Civil Engineering*. 2017. No. 7 (75). pp. 94–105.

15. Sokolov O.M., Kosenko S.A., Akimov S.S. Monitoring ekspluatatsionnoy raboty differentsirovanno termouprochnennykh rel'sov na Zapadno-Sibirskoy zheleznoy doroge [Monitoring of operational work of differentially heat-strengthened rails on the West Siberian Railway] // *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*. Materialy VIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Irkutsk izd-vo IrGUPS. 2017. pp. 473–478.

16. Velichko D.V., Sevost'yanov A.A. Antereykin Ye.S. Otsenka nadezhnosti rel'sov na uchastkakh Transsibirskoy magistrali [Assesment of rails reliability on the sections of the Trans-

Siberian railway] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [*The Siberian Transport University Bulletin*]. 2019. No 1 (48). pp. 5–11.

17. Defekty rel'sov. Klassifikatsiya, katalog i parametry defektnykh i ostrodefektnykh rel'sov [Rail defects. Classification, catalog and parameters of defective and sharply defective rails: approved] : utv. rasporyazheniyem OAO «RZHD» 23.10.14 № 2499r. Moskva. 140 p.

18. Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZHD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga) [The strategy of scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book)] : Rasporyazheniye OAO «RZHD» ot 17.04.2018 No 769/r. Rezhim dostupa: <https://www.irgups.ru>.

Информация об авторах

Терентьев Иван Николаевич – студент факультета «Строительство железных дорог», Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, e-mail: iternik2020@gmail.com

Information about the authors

Terentyev Ivan Nikolaevich – student of the faculty of Railway Construction, Siberian State University, Novosibirsk, e-mail: iternik2020@gmail.com