



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 625.143.2

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-339-346

EDN: <https://elibrary.ru/velnys>**РАЗРАБОТКА РЕЛЬСОВ НОВОЙ КАТЕГОРИИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ
В ОСОБО ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ****Е. Н. Токмакова**✉, **И. Е. Перков**, **П. В. Иванов**, **К. Л. Заграничек**Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация**АННОТАЦИЯ**

Введение. В условиях ежегодного повышения грузонапряженности на дорогах Восточного полигона эффективным техническим решением проблемы повышенного количества сходов подвижного состава по причине излома рельсов является разработка новой категории рельсов для условий холодного климата, обладающих повышенной твердостью для увеличения износостойкости и контактной выносливости с одновременно высокими значениями ударной вязкости. Такой комплекс свойств может быть достигнут при использовании отдельного нагрева под закалку и охлаждении закалочной средой с высокой охлаждающей способностью. Рельсы, изготовленные по такой технологии, будут относиться к новой категории. В связи с этим целью работы являлось создание новой категории рельсов для их применения в особо тяжелых условиях эксплуатации.

Материалы и методы. В работе исследовалось влияние отдельного индукционного нагрева перед дифференцированной закалкой сжатым воздухом контролируемой влажности на микроструктуру и механические свойства рельсов типа Р65: твердость, механические свойства при испытаниях на растяжение и удар, предел выносливости, циклическую трещиностойкость.

Результаты. Приведен сравнительный анализ полученных результатов с аналогичными показателями для рельсов категорий ДТ350, ДТ370ИК и ДТ350НН по ГОСТ Р 51685–2013. Исследования химического состава, механических свойств, твердости на поверхности катания головки рельсов и по сечению, а также микроструктуры рельсов опытной партии показали их соответствие требованиям ГОСТ Р 51685–2013 для рельсов категорий ДТ350, ДТ370ИК, ДТ350НН.

Обсуждение и заключение. Показано, что в результате применения дифференцированного термического упрочнения рельса с использованием сжатого воздуха контролируемой влажности в качестве закалочной среды получена новая категория рельсов ДТО350НН, характеризующаяся благоприятным сочетанием прочностных свойств, характеристик пластичности и показателей сопротивления хрупкому разрушению. Рельсы новой категории могут быть рекомендованы для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации (в кривых участках пути малого радиуса при пониженных температурах), в том числе на дорогах Восточного полигона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожные рельсы, эксплуатационная стойкость, дифференцированное термоупрочнение, сжатый воздух контролируемой влажности, индукционный нагрев, механические свойства, микроструктура

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Для цитирования: Токмакова Е. Н., Перков И. Е., Иванов П. В., Заграничек К. Л. Разработка рельсов новой категории для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 339–346. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-339-346>.

✉ tokmakova.ekaterina@vniizht.ru (Е. Н. Токмакова)

© Токмакова Е. Н., Перков И. Е., Иванов П. В.,
Заграничек К. Л., 2022



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.143.2

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-339-346

EDN: <https://elibrary.ru/velnys>



DEVELOPMENT OF A NEW CATEGORY RAILS FOR APPLICATION IN EXTREMELY SEVERE OPERATING CONDITIONS

Ekaterina N. Tokmakova✉, Ivan E. Perkov, Pavel V. Ivanov,
Konstantin L. Zagranichek

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the context of the annual increase in traffic on the railways of the Eastern Polygon, an effective technical solution to the problem of an increased number of rolling stock derailments caused by rail failure is the development of a new category of rails for cold climate conditions, which have increased hardness to increase wear resistance and contact endurance while simultaneously providing high impact strength. Such a combination of properties can be achieved by using a separate heating process for quenching and cooling with a quenching medium of high cooling capacity. Rails made using this technology will belong to a new category. In this regard, the aim of the work was to create a new category of rails for their use in particularly severe operating conditions.

Materials and methods. This article studies the influence of separate induction heating before differential hardening with compressed air of controlled humidity on the microstructure and mechanical properties of P65 type rails: hardness, mechanical properties during tensile and impact tests, endurance limit, cyclic crack resistance.

Results. The authors present a comparative analysis of the obtained results with similar indicators for rails of categories DT350, DT370IK and DT350NN according to GOST R 51685–2013. Studies of the chemical composition, mechanical properties, hardness on the tread surface of the railhead and in cross section, as well as the microstructure of the experimental batch of the rails showed their compliance with the requirements of GOST R 51685–2013 for rails of categories DT350, DT370IK, DT350NN.

Discussion and conclusion. It is shown that as a result of the use of differentiated thermal hardening of the rail using compressed air of controlled humidity as a quenching medium, a new category of rails DT350NN was obtained, characterised by a favourable combination of strength properties, plasticity characteristics and brittle fracture resistance indicators. Rails of the new category could be recommended for use in particularly difficult operating conditions (in curved sections of track with a small radius at low temperatures), including on the roads of the Eastern Polygon.

KEYWORDS: rails, operational durability, differential heat strengthening, compressed air of controlled humidity, induction heating, mechanical properties, microstructure

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

For citation: Tokmakova E. N., Perkov I. E., Ivanov P. V., Zagranichek K. L. Development of a new category rails for application in extremely severe operating conditions. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(4):339-346. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-339-346>.

✉ tokmakova.ekaterina@vniizht.ru (E. N. Tokmakova)

Введение. Анализ количества сходов подвижного состава по причине излома рельсов в период с 2010 по 2021 г. показал, что 52% сходов были допущены на железных дорогах Восточного полигона, которые характеризуются особо тяжелыми условиями, в том числе высокой грузонапряженностью (свыше 100 млн т·км брутто/км в год), повышенными осевыми нагрузками, кривыми участками пути малого радиуса (менее 650 м), наличием участков с неоднородным ландшафтом, затяжными подъемами и спусками, а также длительным воздействием пониженных температур. Грузонапряженность на дорогах Восточного полигона за последние десять лет выросла почти на 40%.

Для решения проблемы повышенного износа рельсов в таких условиях была разработана новая категория рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости — ДТЗ70ИК. Однако рельсы данной категории, уложенные на сложных участках сети РЖД, показали недостаточно высокий эксплуатационный ресурс [1].

Эффективным техническим решением вопроса разработки надежных и долговечных рельсов новой категории для условий холодного и умеренно холодного климата является освоение производства рельсов с повышенной твердостью для увеличения контактной выносливости и износостойкости и одновременно с высокими значениями ударной вязкости [2, 3]. Данное сочетание свойств может быть получено путем реализации технологии закалочного охлаждения, обеспечивающей формирование в головке рельса достаточно глубокого слоя с однородной дисперсной микроструктурой с мелким исходным зерном аустенита [4–7]. Решение такой сложной металлургической задачи возможно при использовании отдельного печного или индукционного нагрева рельсов под закалку [8, 9] и охлаждении закалочной средой с высокой охлаждающей способностью (сжатый воздух контролируемой влажности [10–12], водовоздушная смесь [12], спрейерное охлаждение водой [13, 14]).

В связи с этим целью работы являлось исследование новой категории рельсов, предназначенных для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации.

Материалы и методы. Объект исследования — рельсы типа Р65 производства АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» («ЕВРАЗ НТМК») опытной партии. Данные рельсы были дифференцированно термоупрочнены воздухом контролируемой влажности с отдельного индукционного нагрева научно-производственным предприятием «Томская электронная компания» (ООО НПП «ТЭК»).

Химический состав стали исследуемых рельсов определяли на оптико-эмиссионном спектрометре Q8 Magellan. Механические свойства при растяжении

определяли на образцах диаметром 6 мм и длиной рабочей части 30 мм, ударную вязкость — на образцах размером 10×10×55 с U-образным надрезом радиусом 1 мм и глубиной 2 мм при температуре +20 и –60 °С. Измерение твердости поверхности катания и поперечного сечения рельсов по Бринеллю производилось на поперечном темплете в точках на поверхности катания, на глубине 10 и 22 мм от поверхности катания, на глубине 10 мм от выкружки, в шейке, а также в подошве рельса опытной партии. Твердость на поверхности катания измеряли на трех пробах рельсов с расстоянием между тремя замерами не менее 25 мм. Место измерения твердости на поверхности катания головки рельса было зачищено для удаления окалина и обезуглероженного слоя металла на глубину не более 0,5 мм.

При проведении усталостных испытаний по оценке условного предела выносливости использовались шесть рельсовых проб опытной партии длиной (1200 ± 15) мм. Испытания проводили с использованием испытательной машины ЦД-200 ПУ в положении рельса «головкой вниз» при приложении циклической нагрузки. Коэффициент асимметрии цикла нагружения составил 0,1. Базовое количество циклов нагружения — 2 000 000.

Исследования микроструктуры проводились на металлографических шлифах, изготовленных из головки исследуемых рельсов в направлении, поперечном прокатке. Шлифы подвергали травлению 4%-м раствором азотной кислоты. Микроструктура изучалась на сканирующем электронном микроскопе Quanta 650 (компания FEI, Нидерланды) в режиме вторичных электронов при увеличении ×5000. Размерные характеристики микроструктуры определялись методом случайных секущих по изображениям, полученным на сканирующем электронном микроскопе.

Результаты и обсуждение. Химический состав стали исследуемых рельсов приведен в табл. 1.

Представленный в табл. 1 химический состав стали опытных рельсов показывает их соответствие стали марки 90АФ по ГОСТ Р 51685–2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия», за исключением повышенного содержания углерода

Таблица 1

Химический состав опытной партии рельсов

Table 1

Chemical composition of the experimental batch of rails

Категория	Содержание элементов, %								
	C	Mn	Si	V	Cr	N	P	S	Al
Опытная партия	0,986	0,913	0,425	0,09	—	0,015	0,008	0,004	0,004

Таблица 2
Механические свойства рельсов

Mechanical properties of the rails

Категория	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
Опытная партия	1400	941	12,5	33,9
ДТ350	1290	870	11,0	32,0
ДТ350НН	1273	849	12,4	33,3
ДТ370ИК	1359	919	10,8	23,4
Требования ГОСТ Р 51685–2013 к категории ДТ350НН	≥1180	≥800	≥9,0	≥25,0
Требования ГОСТ Р 51685–2013 к категории ДТ370ИК	≥1280	≥870	≥9,0	≥14,0

Table 2

Таблица 3

Ударная вязкость рельсов

Impact strength of the rails

Категория	Ударная вязкость, Дж/см ²	
	при +20 °С	при –60 °С
Опытная партия	24,5	13,9
ДТ350	24,7	15,9
ДТ350НН	25,0	18,5
ДТ370ИК	20,9	8,6
Требования ГОСТ Р 51685–2013 к категории ДТ350НН	–	≥15
Требования ГОСТ Р 51685–2013 к категории ДТ370ИК	≥15	–

Table 3

на 0,016% с учетом допускаемого отклонения. Данный факт свидетельствует о том, что рельсы опытной партии являются рельсами высокого класса прочности. Рельсы, произведенные с таким содержанием углерода с применением дифференцированного термоупрочнения с прокатного нагрева, как правило, характеризуются пониженными значениями статической и циклической трещиностойкости, ударной вязкости и повышенными значениями прочностных характеристик, таких как временное сопротивление, предел текучести, твердость.

В табл. 2 представлены значения механических свойств рельсов после испытаний на растяжение и удар.

По уровню механических свойств рельсы опытной партии превышают аналогичные показатели для рельсов категорий ДТ350, ДТ350НН, ДТ370ИК. При высоких прочностных характеристиках на рельсах опытной партии получены более высокие по сравнению с рассматриваемыми категориями рельсов характеристики пластичности (относительное удлинение, относительное сужение).

В табл. 3 представлены результаты испытаний по оценке ударной вязкости рельсов.

Существенное преимущество по уровню ударной вязкости рельсов опытной партии в сравнении с рельсами аналогичного класса прочности категории ДТ370ИК (на 15% выше при положительной температуре образцов и на 38% выше при отрицательной температуре образцов), а также сопоставимые значения данного параметра для рельсов опытной партии и категории ДТ350 общего назначения подтверждают эффективность применения отдельного индукционного нагрева и сжатого воздуха контролируемой влажности в качестве закалочной среды в части формирования одновременно высоких прочностных характеристик и показателей пластичности.

Результаты измерения твердости приведены в табл. 4.

Твердость на поверхности катания головки рельсов и по сечению соответствует требованиям ГОСТ Р 51685–2013. Твердость рельсов опытной партии имеет сопоставимые значения в головке на поверхности катания и на глубине 10 мм, а также характеризуется более низкой твердостью в головке на глубине 22 мм, в шейке и подошве по сравнению с твердостью рельсов категории ДТ370ИК. По сравнению с рельсами категорий ДТ350 и ДТ350НН рельсы опытной партии обладают твердостью на 2–8% выше в головке и имеют сопоставимую твердость подошвы. Данный факт подтверждает, что рельсы опытной партии относятся к рельсам высокого класса прочности.

Важнейшими характеристиками рельсов, отвечающими за безопасность, надежность и долговечность при их эксплуатации, являются условный предел выносливости и циклическая трещиностойкость, определяемые при усталостных испытаниях полнопрофильных рельсовых проб. Результаты циклических испытаний по определению условного предела выносливости и циклической трещиностойкости приведены в табл. 5.

Рельсы опытной партии, дифференцированно термоупрочненные воздухом контролируемой влажности с отдельного индукционного нагрева, соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685–2013 для всех классов

Таблица 4

Твердость НВ по сечению рельсов

Table 4

Hardness HB over the cross section of the rails

Категория	Место определения твердости				
	на поверхности катания	на глубине 10 мм от поверхности катания головки и выкружки	на глубине 22 мм от поверхности катания головки	в шейке	в подошве
Опытная партия	410	393–398	356	330	347
ДТ350	381	360–372	345	323	330
ДТ350НН	377	362–366	344	325	350
ДТ370ИК	400	395–399	375	342	365
Требования ГОСТ Р 51685–2013 к категории ДТ350НН	352–405	≥341	≥321	≤341	≤363
Требования ГОСТ Р 51685–2013 к категории ДТ370ИК	370–409	≥363	≥352	≤352	≤388

прочности (табл. 5). Предел выносливости рельсов опытной партии находится практически на одном уровне (на 2 % ниже) с пределом выносливости рельсов категорий ДТ350, ДТ370ИК и на 5 % выше, чем у рельсов категории ДТ350НН. В части циклической трещиностойкости рельсы опытной партии характеризуются наибольшим значением данного параметра и превосходят рельсы категории ДТ350 на 21 %, ДТ350НН — на 23 %, ДТ370ИК — на 36 %.

Необходимо отметить, что рельсы опытной партии изготовлены из заэвтектоидной стали и позиционируются в данном случае как рельсы высокого класса прочности. При этом рельсы опытной партии при высоких значениях прочностных характеристик и твердости в головке обладают самой высокой циклической трещиностойкостью, нехарактерной для рельсов такого класса прочности, что подтверждают результаты испытаний рельсов категории ДТ370ИК (рис. 1).

Достижение высокого уровня сопротивления хрупкому разрушению на рельсах опытной партии очень актуально с точки зрения эксплуатации в особо тяжелых условиях железных дорог Восточного полигона с большим годовым перепадом температур и связано в первую очередь с применением отдельного индукционного нагрева и сжатого воздуха контролируемой влажности в качестве закалочной среды.

Важным фактором, определяющим прочностные и пластические характеристики рельсовой стали, а также ее циклическую трещиностойкость и стойкость к контактно-усталостным выкрашиваниям, является сама микроструктура матрицы,

дисперсность и морфология ее составляющих. Изображения микроструктуры исследуемых образцов рельсов опытной партии и различных категорий, полученные методом растровой электронной микроскопии, представлены на рис. 2.

Установлено, что микроструктура основного металла в головке рельсов опытной партии представлена пластинчатым перлитом балла 1 по шкале 1 ГОСТ 8233–56 «Сталь. Эталоны микроструктуры» с участками карбидной сетки, бейнит и мартенсит, а также мелкие разрозненные участки феррита в структуре

Таблица 5

Значения пределов выносливости и средней циклической трещиностойкости рельсов

Table 5

The limits of endurance and average cyclic crack resistance of the rails

Категория рельсов	Предел выносливости, МПа	Циклическая трещиностойкость, МПа·м ^{1/2}
Опытная партия	472,0	54,4
ДТ350	481,1	42,8
ДТ350НН	453,0	41,9
ДТ370ИК	481,1	35,0
Требования к ДТ350НН ГОСТ Р 51685–2013	Не менее 370	Не менее 32
Требования к ДТ370ИК ГОСТ Р 51685–2013	Не менее 350	Не менее 28

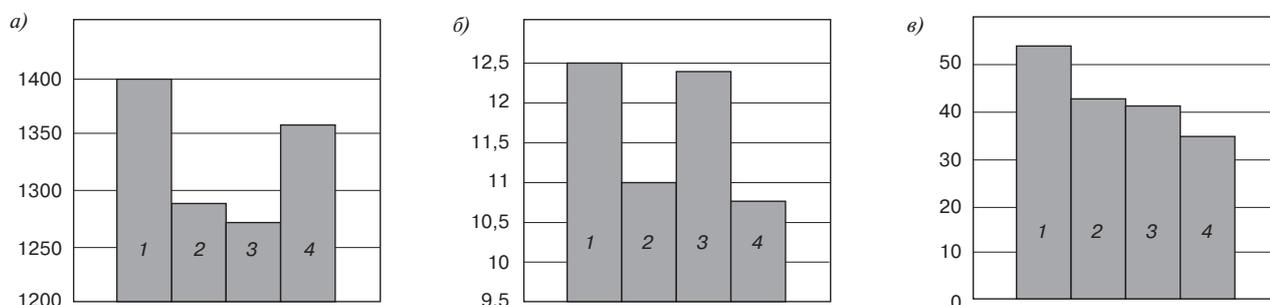


Рис. 1. Сравнение ключевых показателей качества рельсов:
a — временное сопротивление, МПа; *б* — относительное удлинение, %; *в* — циклическая трещиностойкость, МПа·м^{1/2}:
 1 — опытная партия; 2 — категория ДТ350; 3 — категория ДТ350НН; 4 — категория ДТ370ИК

Fig. 1. Comparison of key indicators of rail quality:
a — temporal resistance, MPa; *б* — relative elongation, %; *в* — cyclic crack resistance, MPa·m^{1/2}:
 1 — experimental batch; 2 — category DT350; 3 — category DT350NN; 4 — category DT370IK

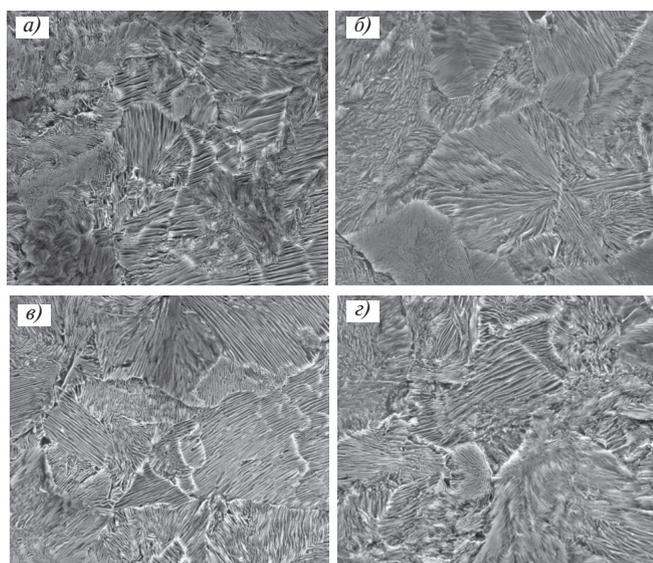


Рис. 2. Микроструктура основного металла головки рельсов, ×5000:
a — опытная партия; *б* — категория ДТ350;
в — категория ДТ350НН; *г* — категория ДТ370ИК

Fig. 2. Microstructure of the base metal of the rail head, ×5000:
a — experimental batch; *б* — category DT350;
в — category DT350NN; *г* — category DT370IK

отсутствуют. Для опытной партии среднее значение размеров перлитных колоний и межпластинчатое расстояние перлита составило 5,6 мкм и 67 нм в центре головки и 5,5 мкм и 68 нм в области выкружки. Сравнительный анализ рельсов рассматриваемых категорий (ДТ350, ДТ350НН, ДТ370ИК) и опытной партии показал, что микроструктура головки рельсов опытной партии имеет меньшие размеры структурных составляющих, а также характеризуется отсутствием участков феррита. Меньший раз-

мер структурных составляющих позволяет достичь более высокого уровня пластических характеристик, что подтверждено результатами испытаний по оценке ударной вязкости. Формированию мелкодисперсной структуры способствует применение отдельного индукционного нагрева перед дифференцированной закалкой сжатым воздухом контролируемой влажности.

Выводы. В результате применения дифференцированного термического упрочнения рельсовой стали с использованием сжатого воздуха контролируемой влажности в качестве закалочной среды получена новая категория рельсов (ДТ350НН), характеризующаяся благоприятным сочетанием прочностных свойств, характеристик пластичности и показателей сопротивления хрупкому разрушению.

Полученный уровень свойств позволяет в дальнейшем рекомендовать новую категорию рельсов для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации в крутых кривых при низких температурах, в том числе на дорогах Восточного полигона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шур Е. А., Борц А. И., Абдурашитов А. Ю. Увеличить ресурс рельсов, лимитируемый их боковым износом // Путь и путевое хозяйство. 2017. № 5. С. 2–8.
2. Термически упрочненные рельсы / А. Ф. Золотарский [и др.]; под ред. А. Ф. Золотарского. М.: Транспорт, 1976. 264 с.
3. Shur E., Borts A., Zakharov S. Rails for Low Operating Temperature and High Speed // Transportation Soil Engineering in Cold Regions (TRANSOILCOLD 2019): Proceedings of the conference (St. Petersburg, 15–22 April 2019). Singapore: Springer, 2020. P. 221–232.
4. Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения / С. В. Хлыст [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2013. № 6. С. 14–20.
5. Производство и термическая обработка железнодорожных рельсов / В. В. Лемпицкий [и др.]. М.: Металлургия, 1972. 272 с.

6. Шур Е.А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов // Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов: материалы II Всерос. науч.-техн. семинара (Екатеринбург, 16–17 мая 2006 г.): сб. науч. тр. / ред. Л.А. Смирнов [и др]. Екатеринбург: УИМ, 2006. С. 37–63.

7. Парышев Ю.М., Раузин Я.Р. Свойства рельсов, закаленных различными способами // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1964. №5. С. 31–33.

8. Шур Е.А. Термическое упрочнение железнодорожных рельсов // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов: науч.-техн. семинар (Москва, 22–25 октября 2019 г.): сб. тезисов. М.: НИТУ «МИСиС», 2019. С. 23–24.

9. Шур Е.А. Изучение процесса структурообразования при термической обработке рельсов // Труды ЦНИИ МПС. 1966. Вып. 314. С. 103–114.

10. Опыт проведения дифференцированной термообработки воздушным способом по технологии ТЭК-ДТ на промышленной установке ТЭК-ДТО-20-13,6 / С.В. Хлыст [и др.] // Инженерные решения. Черная металлургия. 2013. №1. С. 20–22.

11. Development of an Innovative Digital Cooling Technology (Differential Heat Treatment) for EVRAZ NTMK Rails / A. V. Kushnarev [et al.] // Steel in Translation. 2020. Vol. 50, no. 6. P. 415–419.

12. Перспективы развития рельсового производства в России / А.И. Борц [и др.] // Промышленный транспорт XXI век. 2017. №3–4. С. 11–16.

13. Пан А.В. Разработка и освоение новых технологий для текущего и перспективного производства рельсов: дис. ... д-ра техн. наук в форме науч. докл.: 05.16.01. М., 1999. 123 с.

14. Патент № 2003705 Российская Федерация, МПК C21D 9/04. Способ термической обработки рельсов и установка для его осуществления: № 05036339: заявл. 01.03.1992: опубл. 30.11.1993 / Федин В.М. [и др.]. 10 с.

REFERENCES

1. Shur E.A., Borts A.I., Abdurashitov A.Yu. Uvelichit' resurs rel'sov, limitiruemyy ikh bokovym iznosom [Increasing the resource of rails, limited by their lateral wear]. *Put' i putevoe khozaystvo = Railway Track and Facilities*. 2017;(5):2-8. (In Russ.).

2. Zolotarskiy A. F., Rauzin Ya. R., Shur E. A. et al. Termicheskiy uprochnnyye rel'sy [Thermally hardened rails]. Moscow: Transport Publ.; 1976. 264 p. (In Russ.).

3. Shur E., Borts A., Zakharov S. Rails for Low Operating Temperature and High Speed. Transportation Soil Engineering in Cold Regions (TRANSOILCOLD 2019). Proceedings of the conference (St. Petersburg, April 15–22, 2019). Singapore: Springer Publ.; 2020. P. 221–232.

4. Khlyst S. V., Kuz'michenko V. M., Rezanov V. A. et al. Perspektivnaya tekhnologiya proizvodstva rel'sov dlya vysokoskorostnogo i tyazhe-lovesnogo dvizheniya [Perspective technology for the production of rails for high-speed and heavy traffic]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2013;(6):14-20. (In Russ.).

5. Lempitskiy V. V., Kazarnovskiy D. S., Gubert S. V. et al. Proizvodstvo i termicheskaya obrabotka zheleznodorozhnykh rel'sov [Production and heat treatment of rails]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1972. 272 p. (In Russ.).

6. Shur E.A. Vliyaniye struktury na ekspluatatsionnyuyu stoykost' rel'sov [Influence of the structure on the service life of rails]. Vliyaniye svoystv metallicheskoj matritsy na ekspluatatsionnyuyu stoykost' rel'sov [Influence of the properties of the metal matrix on the service life of rails]. Proc. of 2nd All-Russian sci.-tech. seminar (Ekaterinburg, May 16–17, 2006). Ekaterinburg: UIM Publ.; 2006. P. 37–63. (In Russ.).

7. Paryshev Yu. M., Rauzin Ya. R. Svoystva rel'sov, zakalennykh razlichnymi sposobami [Properties of rails hardened in various ways]. *Vestnik*

Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal. 1964;(5):31-33. (In Russ.).

8. Shur E. A. Termicheskoye uprochneniye zheleznodorozhnykh rel'sov [Thermal hardening of rails]. Bernshteynovskie chteniya po termomekhanicheskoy obrabotke metallicheskiykh materialov [Bernshtein readings on thermomechanical processing of metallic materials]. Proc. of scientific and technical seminar (Moscow, October 22–25, 2019). Moscow: NITU MISiS Publ.; 2019:23-24. (In Russ.).

9. Shur E.A. Izuchenie protsessa strukturoobrazovaniya pri termicheskoy obrabotke rel'sov [Study of the process of structure formation during heat treatment of rails]. *Trudy TsNII MPS = Proceedings of the Central Research Institute of MPS*. 1966;(314):103-114. (In Russ.).

10. Khlyst S. V., Kuz'michenko V. M., Khlyst I. S., Gontar' A. I. Opyt provedeniya differentsirovannoy termoobrabotki vozdushnym sposobom po tekhnologii TEK-DT na promyshlennoy ustanovke TEK-DTO-20-13,6 [Experience in conducting differentiated air heat treatment using the TEK-DT technology on an industrial plant TEK-DTO-20-13,6]. *Inzhenernye resheniya. Chernaya metallurgiya = Engineering Solutions. Ferrous Metallurgy*. 2013;(1):20-22. (In Russ.).

11. Kushnarev A. V., Kirichkov A. A., Belokurova E. V. et al. Development of an Innovative Digital Cooling Technology (Differential Heat Treatment) for EVRAZ NTMK Rails. *Steel in Translation*. 2020;50(6):415-419.

12. Borts A. I., Shur E. A., Reykhart V. A. et al. Perspektivy razvitiya rel'sovogo proizvodstva v Rossii [Prospects for the development of rail production in Russia]. *Promyshlennyy transport XXI vek = Industrial transport XXI century*. 2017;(3-4):11-16. (In Russ.).

13. Pan A. V. Razrabotka i osvoeniye novykh tekhnologiy dlya tekushchego i perspektivnogo proizvodstva rel'sov [Development and development of new technologies for the current and prospective production of rails]. Dr. of Sci. (Engineering) thesis: 05.16.01. Moscow; 1999. 123 p. (In Russ.).

14. Fedin V. M., Devyatkin V. P., Shur E. A. et al. Patent No. 2003705 Russian Federation, MПК C21D 9/04. Sposob termicheskoy obrabotki rel'sov i ustanovka dlya ego osushchestvleniya [A method of heat treatment of rails and installation for its implementation]: No. 05036339: appl. 01.03.1992: publ. 30.11.1993. 10 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Екатерина Николаевна ТОКМАКОВА,

инженер 2-й категории, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1097983, <https://orcid.org/0000-0003-0451-2954>

Иван Евгеньевич ПЕРКОВ,

технический эксперт, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, perkov.ivan@vniizht.ru), Author ID: 1165030, <https://orcid.org/0000-0002-1762-5678>

Павел Вячеславович ИВАНОВ,

инженер 2-й категории, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, ivanov.pavel@vniizht.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9635-0528>

Константин Львович ЗАГРАНИЧЕК,

заведующий лабораторией, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, zagranichek.k@vniizht.ru), Author ID: 808109, <https://orcid.org/0000-0001-8702-4264>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ekaterina N. ТОКМАКОВА,

2nd category Engineer, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1097983, <https://orcid.org/0000-0003-0451-2954>

Ivan E. PERKOV,

Technical Expert, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St., perk.ivan@vniizht.ru), Author ID: 1165030, <https://orcid.org/0000-0002-1762-5678>

Pavel V. IVANOV,

2nd category Engineer, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St., ivanov.pavel@vniizht.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9635-0528>

Konstantin L. ZAGRANICHEK,

Head of Laboratory, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St., zagranichek.k@vniizht.ru), Author ID: 808109, <https://orcid.org/0000-0001-8702-4264>

ВКЛАД АВТОРОВ

Екатерина Николаевна ТОКМАКОВА. Подготовка рукописи статьи, проведение исследований, обсуждение результатов (30%).

Иван Евгеньевич ПЕРКОВ. Проведение исследований, обсуждение результатов, рецензирование и редактирование рукописи статьи (40%).

Павел Вячеславович ИВАНОВ. Проведение исследований, формальный анализ результатов (10%).

Константин Львович ЗАГРАНИЧЕК. Определение направления исследования, формулировка цели и задач, организация проведения исследований, разработка методик, обсуждение результатов (20%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Ekaterina N. ТОКМАКОВА. Preparing the manuscript of the article, conducting research, discussing the results of research (30%).

Ivan E. PERKOV. Conducting research, discussing research results, reviewing and editing the manuscript of the article (40%).

Pavel V. IVANOV. Conducting research, formal analysis of results (10%).

Konstantin L. ZAGRANICHEK. Determining the direction of research, formulating goals and objectives, organising research, developing methods, discussing research results (20%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 06.07.2022, рецензия от первого рецензента получена 19.08.2022, рецензия от второго рецензента получена 22.08.2022, принята к публикации 01.11.2022.

The article was submitted 06.07.2022, first review received 19.08.2022, second review received 22.08.2022, accepted for publication 01.11.2022.

ПОДПИСКА

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (495) 602-84-56, e-mail: journal@vniizht.ru. Информация о подписке размещена на сайте журнала www.journal-vniizht.ru.

Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press, export@ural-press.ru).