

УДК 629.421

**И. А. Иванов, Д. П. Кононов, С. В. Урушев, А. В. Якушев****ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ КОЛЕСАХ  
ПОСЛЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ**

Дата поступления: 24.02.2016

Решение о публикации: 06.09.2016

**Цель:** Проверить соответствие остаточных напряжений, действующих в цельнокатанных колёсах, требованиям нормативных документов после упрочняющей локальной термообработки. **Методы:** При испытаниях в соответствии с требованиями ГОСТ 32207-2013 производили локальную термообработку дисков цельнокатанных колёс с последующей радиальной огневой разрезкой от гребня до ступицы с измерением схождения кромок, разрезали колеса на секторы параллельно оси колеса с измерением внутренних напряжений с помощью двухкомпонентных тензорезисторов с базой 5 мм, наклеенных в месте перехода диска в обод, обрабатывали данные с построением эпюр внутренних напряжений. **Результаты:** Выявлено, что на поверхности катания по кругу катания остаточные окружные напряжения – сжимающие, величина напряжений не превышает допустимых значений; глубина точки перехода сжимающих остаточных окружных напряжений в растягивающие соответствует требованиям нормативной документации. Подтверждены требования нормативных документов по обеспечению безопасного уровня остаточных напряжений для цельнокатанных колёс, подвергнутых локальной термообработке. **Практическая значимость:** Данный метод можно использовать для повышения безопасности движения, надёжности цельнокатанных колёс с учётом перспективы повышения нагрузки на ось.

Колесо, локальная термообработка, остаточные напряжения, безопасность, усталостная прочность.

**Igor A. Ivanov**, D. Sci. (Eng.), professor, ivanov\_1\_7@mail.ru; **\*Dmitriy P. Kononov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, d\_kononov@mail.ru; **Sergey V. Urushev**, D. Sci. (Eng.), professor, tehmet\_pgups@mail.ru; **Aleksey V. Yakushev**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, av-yakushev@ya.ru (Petersburg State Transport University) RESIDUAL STRESSES IN SOLID-ROLLED RAILWAY WHEELS AFTER STRENGTHENING TREATMENT

**Objective:** To check the correspondence of residual stresses in solid-rolled railway wheels to the requirements of regulatory documents after strengthening localised thermal treatment. **Methods:** During checks for correspondence to requirements of state standard GOST 32207-2013 localised thermal treatment of solid-rolled wheel plates was conducted, followed by radial fire cutting from flange to hub with edge toe-in measured. Wheels were cut into sectors parallel to wheel axis with internal stresses measured by two-component resistance strain gauges with 5 mm base glued at the spot where wheel plate turns into rim. Data were processed with building of distribution curves of internal stresses. **Results:** It was established that on tread contact surface residual tangential stresses are compressive in nature. The value of stresses does not exceed permitted values. Depth of transition point of compressive residual tangential stresses into tension stresses conforms to requirements of regulatory documents. Requirements of regulatory documents regarding ensuring safe level of residual stresses for solid-rolled railway wheels subjected to localised thermal treatment. **Practical importance:** This method can be used for increasing traffic safety and reliability of whole-rolled wheels in instances of increasing axial loads.

Wheel, localised thermal treatment, residual stresses, safety, fatigue resistance.

## Введение

В последние годы существенно изменился суммарный пробег колёсных пар [6, 10, 13]. С одной стороны, годовой пробег у нового скоростного подвижного состава увеличился со 150 000–200 000 км до 500 000 км, а назначенный срок службы – до 30 лет, с другой стороны, в России и в странах бывшего СССР по объективным экономическим причинам обострилась проблема замены имеющегося парка на подвижной состав нового поколения, а также возникла необходимость продлить срок службы существующего парка [1, 3–5]. При этом очень большое количество циклов нагружения колёсных пар (до  $10^9$ – $10^{10}$ ) переводит проблему оценки прочности в новый класс задач, а именно из области многоциклового усталости в гигацикловую область [9, 10], имеющую другие закономерности.

В области гигацикловой усталости не подтверждается гипотеза о бесконечной долговечности при напряжениях ниже традиционного предела выносливости, определённого на базе  $10^7$ – $10^8$  циклов, отличается и расположение очагов зарождения трещин [8, 12]. Это подтверждает сообщения о случаях разрушения деталей в различных областях промышленности и железнодорожного транспорта при сравнительно низких, но длительно действующих нагрузках [2, 10]. Исследования показывают, что у образцов, разрушившихся до  $10^7$  циклов нагружения, очаги зарождения трещин находятся в поверхностном слое у какого-либо дефекта или изменения геометрических характеристик поверхности, а у образцов, разрушившихся после  $10^7$  циклов, – под поверхностным слоем [10, 11], преимущественно у сульфидных неметаллических включений или дефектов микроструктуры. То есть для повышения безопасности движения, надёжности цельнокатаных колёс необходимы новые требования к технологиям их изготовления, обработки и упрочнения. При этом следует иметь в виду рассматриваемые перспективы повышения нагрузки на ось.

Для повышения усталостной прочности колёс можно воспользоваться методом локальной термообработки диска, создавая на его поверхности локальные упрочнённые зоны [7].

Уровень остаточных напряжений в деталях и конструкциях является одним из основных показателей качества их изготовления. Величина технологических остаточных напряжений в цельнокатаных вагонных колёсах оказывает большое влияние на их циклическую прочность, скорость распространения трещин и надёжность колёс в эксплуатации.

Проведённые во ВНИИЖТе исследования показали, что уровень остаточных напряжений – как технологических, так и возникающих при перегрузках – значительно влияет на циклическую долговечность колёс [14]. По нормам ГОСТ 10791-2011, величина остаточных напряжений оценивается после радиальной разрезки колеса по сближению его кромок, замеренному на средней окружности обода с базой замера 100 мм. Величина сближения кромок колеса нормирована и должна составлять от 1 до 5 мм.

## Методика проведения эксперимента

Цельнокатаные колёса после локальной термообработки диска проверены на соответствие требованиям ГОСТ 10791-2011, п. 6.14, и РД 32.144-2000, т. е. определены остаточные напряжения. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 32207-2013 и [15]. Для этого диск, обод и зону перехода колеса предварительно подвергали поверхностной закалке с помощью газовой горелки по шести радиальным сечениям (рис. 1). Угол между сечениями составил  $60^\circ$ . Температуру нагрева диска колеса по радиальным сечениям постепенно доводили до  $900$ – $920$  °С. Температуру контролировали дистанционно пирометром. После нагрева изделия охлаждали на воздухе при температуре  $+10$  °С в течение суток.

Далее размечали для кернения базовые точки, по которым определяли знак остаточных напряжений в ободу колеса (рис. 2).



Рис. 1. Фрагмент колеса с участками закалки на внутренней стороне

Измеряли фактическое базовое расстояние до первой радиальной разрезки колеса. По изменению расстояния между базовыми точками после радиального разреза между ними впоследствии устанавливали знак окружных остаточных напряжений.

Двухкомпонентные тензорезисторы с базой 5 мм и сопротивлением 200 Ом наклеивали согласно ГОСТ 32207-2013 (рис. 3). Дополнительно тензорезисторы наклеивали в месте перехода диска в обод. Двухкомпонентные тензорезисторы располагали таким образом, чтобы один совпадал с радиусом колеса, другой – с окружным направлением (по касательной к окружности).

После радиальной разрезки колеса от гребня до ступицы огневым способом расстояние между базовыми точками (сходимость)

Рис. 2. Схема расположения базовых точек

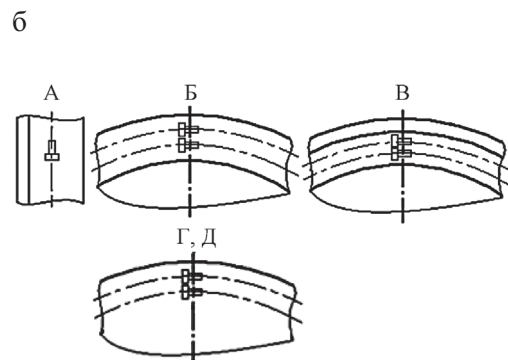
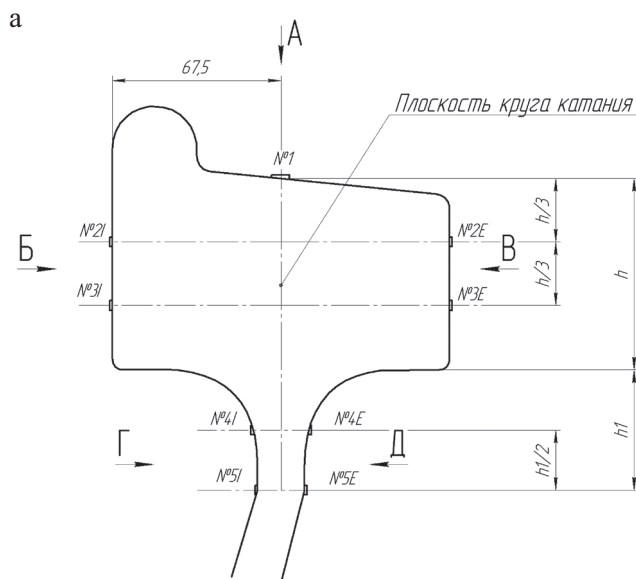
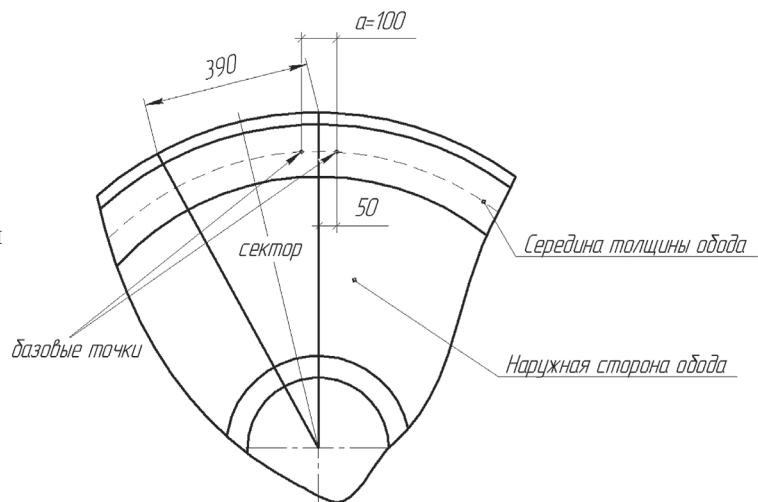


Рис. 3. Схема наклейки тензорезисторов на ободе и приободной части колеса: а) вид в сечении; б) местные виды по стрелкам

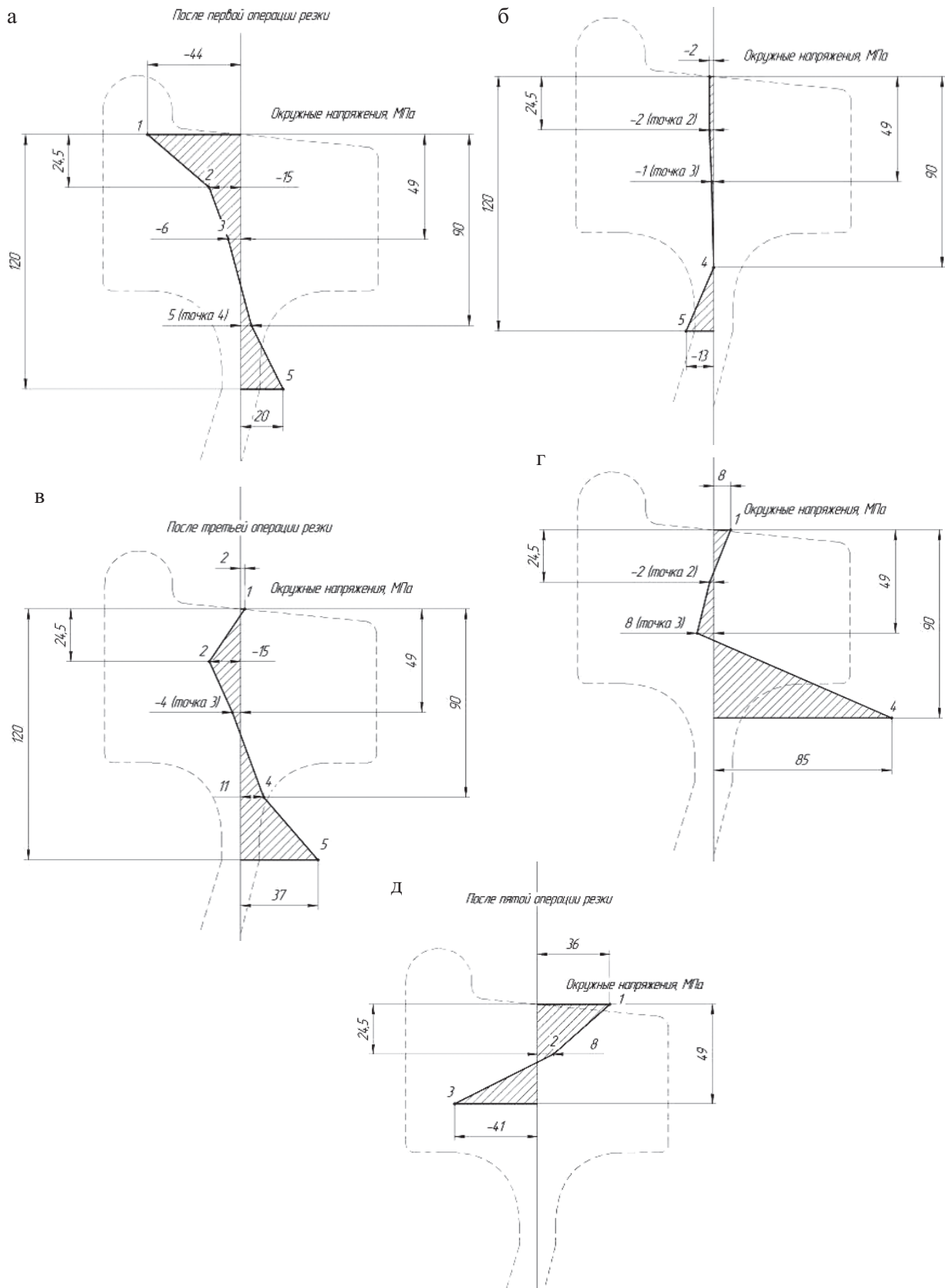


Рис. 4. Эпюры окружных остаточных напряжений по кругу катания после первой (а), второй (б), третьей (в), четвертой (г) и пятой (д) операций резки

уменьшилось на 2,5 мм. Следовательно, знак окружных напряжений отрицательный (сжатие), а значения соответствуют требованиям ГОСТ 10791-2011.

Затем выполняли второй огневой радиальный рез и отделяли сектор от колеса. Показания с тензорезисторов регистрировали после вырезания сектора и его остывания до первоначальной температуры.

Последующие резки обода параллельно оси колеса выполняли механическим способом с охлаждением.

### Обработка результатов эксперимента

Остаточные напряжения  $\sigma_{1,2}$ , МПа, при применении двухкомпонентных розеток тензорезисторов определяли по формулам

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2),$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1),$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – относительная деформация в двух взаимно перпендикулярных направлениях осей тензорезисторов в двухкомпонентной розетке;  $E$  – модуль упругости первого рода, МПа;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Для определения значений остаточных напряжений в плоскости круга катания полученные результаты пересчитывали к плоскости круга катания.

После отделения фрагмента обода цельного колеса от его дисковой части остаточное напряжение, приведенное к плоскости круга катания  $\sigma_{cp}$ , МПа, вычисляли по формуле

$$\sigma_{cp} = \sigma_b \frac{b}{a+b} + \sigma_n \frac{a}{a+b},$$

где  $\sigma_b$  – напряжение, измеренное на внутренней стороне обода, МПа;  $\sigma_n$  – напряжение, измеренное на наружной стороне обода, МПа, напротив точки измерения  $\sigma_b$ ;  $a, b$  – расстояния от плоскости круга катания до внутренней

и наружной граней обода, мм, где измерялись напряжения  $\sigma_b$  и  $\sigma_n$ , соответственно.

Остаточные напряжения,  $\sigma_{cp1}$ , МПа, в приободной части диска колеса определяли по формуле

$$\sigma_{cp1} = \sigma_{b1} \frac{d}{c+d} + \sigma_{n1} \frac{c}{c+d},$$

где  $\sigma_{b1}$  – напряжение, измеренное на внутренней стороне диска, МПа;  $\sigma_{n1}$  – напряжение, измеренное на наружной стороне диска, МПа, напротив точки измерения  $\sigma_b$ ;  $c, d$  – расстояния от плоскости круга катания до внутренней и наружной граней диска, мм, где измеряли напряжения  $\sigma_b$  и  $\sigma_n$ , соответственно.

По результатам измерений построены эпюры остаточных напряжений (рис. 4).

### Заключение

По результатам испытаний колеса с закаленными спицами можно сделать следующие выводы.

1. Испытания методом тензометрии показали, что в колесе с закаленными спицами на поверхности катания по кругу катания остаточные окружные напряжения – сжимающие, они составляют –1 МПа.

2. Сходимость обода после радиальной разрезки составила 2,5 мм, что подтверждает отрицательные значения остаточных окружных напряжений и соответствует требованиям ГОСТ 10791-2011.

3. Глубина точки перехода сжимающих остаточных окружных напряжений в растягивающие составила 62 мм при допустимом значении не менее 40 мм. По данному параметру колесо с закаленными спицами из стали марки 2 и коническим диском соответствует требованиям РД 32.144-2000.

### Библиографический список

1. Богданов А. Ф. Улучшение свойств металла обода колесных пар тягового подвижного состава / А. Ф. Богданов, А. М. Будюкин, И. А. Иванов



и др. // Бюллетень результатов научных исследований. – 2014. – № 1 (10). – С. 22–30.

2. Ботвина Л. Р. Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения / Л. Р. Ботвина // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 4. – С. 41–51.

3. Воробьев А. А. Влияние термообработки на свойства колесной стали при ремонте / А. А. Воробьев, Д. А. Жуков, А. А. Соболев // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2014. – № 19. – С. 36–38.

4. Воробьев А. А. Моделирование динамики подвижного состава / А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко, К. А. Мерочник // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2015. – № 21. – С. 24–30.

5. Жуков Д. А. Влияние индукционного нагрева на структуру колесной стали в процессе ремонта / Д. А. Жуков, И. А. Иванов, А. А. Соболев // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2013. – № 17. – С. 31–33.

6. Иванов И. А. Моделирование сил резания при шлифовании профиля железнодорожных колес / И. А. Иванов, Д. Д. Евсеев, И. В. Овсяникова, А. С. Тарапанов // Изв. ПГУПС. – 2015. – Вып. 3. – С. 45–54.

7. Кононов Д. П. Увеличение долговечности вагонных колес методом локальной термообработки / Д. П. Кононов // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 2.

8. Кушнер В. С. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар : моногр. / В. С. Кушнер, А. А. Крутько, А. А. Воробьев и др. – Омск : Омский гос. техн. ун-т, 2015. – 224 с.

9. Махутов Н. А. Усталость металлов в широком диапазоне числа циклов / Н. А. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 4. – С. 37–41.

10. Никольская Э. Н. К вопросу об оценке прочности осей и колёс при увеличении пробегов и сроков службы колёсных пар / Э. Н. Никольская, В. И. Грек // Конструктивно-технологическое обеспечение надёжности колёс рельсовых экипажей: сб. науч. тр. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2009. – С. 41–49.

11. Петрова И. М. Оценка циклической прочности конструкционных сталей в области длительной долговечности / И. М. Петрова, И. В. Гадолина // Вестник машиностроения. – 2005. – № 10.

12. Терентьев В. Ф. Усталость высокопрочных сталей / В. Ф. Терентьев // Деформация и разрушение материалов. – 2006. – № 8. – С. 2–11.

13. Терехов П. М. Перспективы использования колесных пар с бандажами повышенной твердости / П. М. Терехов, А. А. Воробьев // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2012. – № 15. – С. 23–25.

14. Школьник Л. М. Нагрузка текучести и циклическая трещиностойкость цельнокатанных колёс / Л. М. Школьник, М. И. Староселецкий, А. С. Сунгуров, Л. И. Бондаренко // Вестн. ВНИИЖТ. – 1985. – № 4. – С. 25–28.

15. Якушев А. В. Результаты определения остаточных технологических напряжений в дисковой части цельнокатанных колёс грузовых и пассажирских вагонов методом тензометрии / А. В. Якушев, Д. П. Кононов, С. О. Комиченко // Транспорт РФ. – 2015. – № 3. – С. 66–68.

## References

1. Bogdanov A. F., Budyukin A. M., Ivanov I. A., Zhukov D. A. & Urushev S. V. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy – Bull. of Sci. Studies Res.*, 2014, no. 1 (10), pp. 22-30.

2. Botvina L. R. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Materials Diagnostics*, 2004, T. 70, no. 4, pp. 41-51.

3. Vorobyev A. A., Zhukov D. A. & Sobolev A. A. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii – New Materials and Technologies in Engine Building*, 2014, no. 19, pp. 36-38.

4. Vorobyev A. A., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. & Merochnik K. A. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii – New Materials and Technologies in Engine Building*, 2015, no. 21, pp. 24-30.

5. Zhukov D. A., Ivanov I. A. & Sobolev A. A. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii – New Materials and Technologies in Engine Building*, 2013, no. 17, pp. 31-33.

6. Ivanov I.A., Yevseyev D.D., Ovsyanikova I.V. & Tarapanov A.S. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2015, Is. 3, pp. 45-54.
7. Kononov D.P. *Nauka i tekhnika transporta – Transport Sci. and Eng.*, 2014, no. 2.
8. Kushner V.S., Krutko A.A., Vorobyev A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A. & Kerentsev D.Ye. Vliyaniye struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh staley na iznashivaniye i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par [Influence of Structure and Mechanical Properties of Wheel Steels on Wear and Profile Recovery Modes of Wheel Pairs]. Omsk, Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2015. 224 p.
9. Makhutov N.A. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Materials Diagnostics*, 2004, T. 70, no. 4, pp. 37-41.
10. Nikolskaya E.N. & Grek V.I. K voprosu ob otsenke prochnosti osey i koles pri uvelichenii probegov i srokov sluzhby kolesnykh par [On the Issue of Evaluation of Strength of Axles and Wheels in Cases of Increasing Runs and Life Cycles of Wheel Pairs]. *Konstruksionno-tekhnologicheskoye obespecheniye nadezhnosti koles relsovykh ekipazhey: sbornik nauchnykh trudov [Design and Engineering Support for Reliability of Rail-Track Carriages Wheels: Coll. Sci. Papers]*. St. Petersburg, PGUPS, 2009. Pp. 41-49.
11. Petrova I.M. & Gadolina I.V. *Vestnik mashinostroyeniya – Engine-Building Bull.*, 2005, no. 10.
12. Terentyev V.F. *Deformatsiya i razruzeniye materialov – Deformation and Destruction of Materials*, 2006, no. 8, pp. 2-11.
13. Terekhov P.M. & Vorobyev A.A. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii – New Materials and Technologies in Engine Building*, 2012, no. 15, pp. 23-25.
14. Shkolnik L.M., Staroseletskiy M.I., Sungurov A.S. & Bondarenko L.I. *Vestnik VNIIZhT – VNIIZhT Bull.*, 1985, no. 4, pp. 25-28.
15. Yakushev A.V., Kononov D.P. & Komichenko S.O. *Transport Rossiyskoy Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2015, no. 3, pp. 66-68.

ИВАНОВ Игорь Александрович – доктор техн. наук, профессор, ivanov\_1\_7@mail.ru; \*КОНОНОВ Дмитрий Павлович – канд. техн. наук, доцент, d\_kononov@mail.ru; УРУШЕВ Сергей Викторович – доктор техн. наук, профессор, tehmet\_pgups@mail.ru; ЯКУШЕВ Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, av-yakushev@ya.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).