



Оригинальная статья

УДК 629.225.033

DOI 10.17073/0368-0797-2021-7-477-483



МЕТОД УЧЕТА ОСТАТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДИСКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА. СООБЩЕНИЕ 2

С. А. Снитко¹, А. В. Яковченко¹, С. М. Горбатюк²¹ Донецкий национальный технический университет (Украина, 83001, Донецк, ул. Артема, 58)² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Актуальная задача повышения эксплуатационного ресурса штампованно-катаных железнодорожных колес является комплексной проблемой. Существенное влияние на напряженно-деформированное состояние колеса в целом и его диска в частности оказывают остаточные технологические напряжения, полностью устранить которые невозможно. На различных стадиях обработки черновых колес поле остаточных напряжений непрерывно меняется. Это затрудняет учет остаточных напряжений в прочностных расчетах колес. В сообщении 1 настоящей работы предложен метод учета остаточных технологических напряжений, сущность которого заключается в задании при моделировании величины натяга между ступицей и осью больше фактической. Такой подход позволил получить в колесе дополнительные напряжения, которые адекватно отражают влияние остаточных технологических напряжений. В данной части работы выполнена практическая реализация разработанного метода и оценка степени влияния остаточных технологических напряжений на напряженно-деформированное состояние диска колеса при действии эксплуатационных нагрузок. Применительно к конструкции колеса диаметром 957 мм с плоскоконическим диском (ГОСТ 10791 – 2011) выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния диска при действии механических видов нагрузки. Реализованное при расчетах увеличение натяга между ступицей и осью на 60 % позволило установить, что наличие в колесе остаточных технологических напряжений вызывает повышение на 5 – 38 % максимальных эквивалентных напряжений в наиболее нагруженных при эксплуатации зонах диска. Таким образом, предлагаемый метод учета остаточных технологических напряжений позволяет получить верхнюю оценку прочностных характеристик колес, а, следовательно, более адекватно прогнозировать срок их эксплуатации.

Ключевые слова: железнодорожное колесо, напряженно-деформированное состояние, эксплуатационные нагрузки, конечно-элементное моделирование, напряжения в диске, остаточные напряжения, натяг между ступицей и осью, диск колеса

Для цитирования: Снитко С.А., Яковченко А.В., Горбатюк С.М. Метод учета остаточных технологических напряжений при моделировании напряженно-деформированного состояния диска железнодорожного колеса. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 7. С. 477–483. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-477-483>

Original article

ACCOUNTING METHOD FOR RESIDUAL TECHNOLOGICAL STRESSES IN MODELING THE STRESS-DEFORMED STATE OF A RAILWAY WHEEL DISK. REPORT 2

S. A. Snitko¹, A. V. Yakovchenko¹, S. M. Gorbatyuk²¹ Donetsk National Technical University (58 Artema Str., Donetsk 83001, Ukraine)² National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

Abstract. The actual problem of increasing the service life of stamped-rolled railway wheels is a complex problem. Residual technological stresses, which cannot be completely eliminated, have a significant effect on the stress-strain state of the wheel as a whole and its disk in particular. At different stages of roughing wheels machining, the residual stress field is continuously changing. This makes it difficult to take into account the residual stresses in the wheels strength calculations. In Report 1 of this work, an accounting method for residual technological stresses was proposed, the essence of which is to set the value of interference between hub and axle when modeling is greater than the actual one. This approach made it possible to obtain additional stresses in the wheel, which adequately reflect the effect of residual technological stresses. In this part of the work, the authors have carried out practical implementation of the developed method and assessment of the degree of residual technological stresses influence on stress-strain state of the wheel disk under the action of operational loads. With regard to the design of a 957 mm diameter wheel with a flat-conical disk (GOST 10791 – 2011), calculations of stress-strain state of the disk under the action of mechanical types of load have been performed. The 60 % increase in the interference between hub and axle realized in the calculations made it possible to establish that the presence of residual technological stresses in the wheel causes an increase of 5 – 38 % in maximum equivalent stresses in the disk zones most loaded during operation. Thus, the proposed method for residual

technological stresses accounting allows obtaining an upper estimate of the wheels strength characteristics, and, therefore, more adequately predicting their service life.

Keywords: railway wheel, stress-strain state, operational loads, finite element modeling, stresses in disk, residual stresses, interference between hub and axle, wheel disk

For citation: Snitko S.A., Yakovchenko A.V., Gorbatyuk S.M. Accounting method for residual technological stresses in modeling the stress-deformed state of a railway wheel disk. Report 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 7, pp. 477–483. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-477-483>

ВВЕДЕНИЕ

Актуальная задача повышения эксплуатационного ресурса штампованно-катаных железнодорожных колес является комплексной проблемой [1 – 13]. Ее успешное решение требует учета параметров, определяющих условия эксплуатации колес [2, 4, 5, 11], характеристики конструкций [14 – 26], а также технологию производства [24, 25, 27 – 32].

Известно, что форма и размеры дисков колес во многом определяют их жесткость в осевом и радиальном направлении, массу, а также показатели напряженно-деформированного состояния (НДС) при действии эксплуатационных нагрузок [14 – 26].

Также известно, что существенное влияние на НДС колеса в целом и его диска в частности оказывают остаточные технологические напряжения [12, 13, 21, 24, 25]. Данные напряжения, во-первых, всегда имеют место в чистовых колесах [31, 32]. Во-вторых, на различных стадиях обработки черновых колес поле остаточных напряжений также непрерывно меняется. Это в значительной степени затрудняет учет остаточных напряжений в прочностных расчетах колес и оценку их эксплуатационного ресурса, так как многостадийное моделирование поля остаточных напряжений требует учета очень широкого набора математических моделей и параметров [21, 24, 28 – 30]. Они, в свою очередь, определяют свойства материала, окружающей среды и режимы обработки чернового колеса в процессе его остывания после прессопрокатной линии и при последующих отделочных операциях. Поэтому такой подход не получил широкого распространения ни в соответствующей нормативной документации, ни в инженерной практике прочностных расчетов колес.

В сообщении 1 настоящей работы предложен метод учета остаточных технологических напряжений, сущность которого заключается в задании при расчете величины натяга между ступицей и осью больше фактической. Данная часть работы посвящена практической реализации разработанного метода и оценке степени влияния остаточных технологических напряжений на НДС диска колеса при действии эксплуатационных нагрузок.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа выбрана конструкция колеса диаметром 957 мм с плоскоконическим диском [33], которое

до сих пор широко используется на железных дорогах стран СНГ и наиболее хорошо изучено.

Анализ НДС колеса проведен путем конечно-элементного моделирования в системе DEFORM 3D. Выполнено решение объемной задачи для 1/2 части колеса. Размер ребер конечных элементов находился в диапазоне 1,5 – 4,5 мм, что позволило адекватно описать геометрию колеса и неравномерность его НДС. В качестве материала из библиотеки DEFORM 3D выбрана высокоуглеродистая сталь: модуль Юнга – 210 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,3. Тип объекта – упругий.

Известно, что колеса с плоскоконическим диском предназначены для эксплуатации при осевой нагрузке до 23,5 тс [33]. Вместе с тем, при эксплуатации такие колеса часто подвергаются перегрузкам, соответствующим нагрузке на ось до 30 тс [20]. В связи с этим используемые при моделировании величины сил, найденные по методике [34], соответствовали осевым нагрузкам до 25 тс.

Расчеты выполнены для трех основных схем нагружения [34].

Схема 1 предусматривает одновременное действие и вертикальной, и горизонтальной сил, действующих в зоне гребня с наружной стороны колеса. Данная схема характеризует наиболее неблагоприятный вид эксплуатационной нагрузки, который наблюдается при движении колесной пары по кривой.

Схема 2 предусматривает действие вертикальной нагрузки, приложенной в круге катания, что соответствует движению колесной пары по прямому участку пути.

Схема 3 предусматривает действие вертикальной нагрузки на внешнюю (полевую) часть поверхности катания обода. Эта схема соответствует влиянию колесной пары или ее движению по кривой.

Расчетные значения вертикальной и горизонтальной нагрузок составили соответственно 249,2 и 76,7 кН.

Расчеты выполнены с учетом максимально возможной переточки обода до диаметра по кругу катания, равного 860 мм (другие размеры колеса соответствовали номинальным). Диаметр отверстия ступицы в расчетах был равен 190 мм.

Учет при моделировании остаточных технологических напряжений выполнен путем увеличения величины натяга между ступицей и осью на 60 % (с 0,25 до 0,4 мм на диаметр). Как было показано в сообщении 1 настоящей работы, это позволяет создать в модели ко-

леса дополнительные напряжения, адекватно отражающие влияние остаточных технологических напряжений на НДС диска. Так, для колеса диаметром 957 мм с плоскоконическим диском относительные отклонения расчетных значений радиальных напряжений от экспериментальных [16] не превысили 14 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты моделирования НДС колеса без учета влияния остаточных технологических напряжений (натяг между ступицей и осью 0,25 мм) представлены в табл. 1. Результаты моделирования НДС колеса с уче-

том влияния остаточных технологических напряжений (за счет увеличения натяга до 0,4 мм) представлены табл. 2.

В табл. 1, 2 в скобках дополнительно указаны значения радиусов, характеризующие местоположения точек на диске, в которых действуют максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу.

Как показывает сравнительный анализ данных, расчет НДС колеса без учета влияния остаточных технологических напряжений (табл. 1, 2) дает заниженные на 5 – 38 % величины максимальных эквивалентных напряжений в зонах дуг под ободом и над ступицей с внутренней стороны колеса (см. рисунок).

Таблица 1

Максимальные эквивалентные напряжения в диске колеса при действии механических эксплуатационных нагрузок без учета влияния остаточных технологических напряжений

Table 1. Maximum equivalent stresses in the wheel disk under the action of mechanical operating loads without taking into account the effect of residual technological stresses

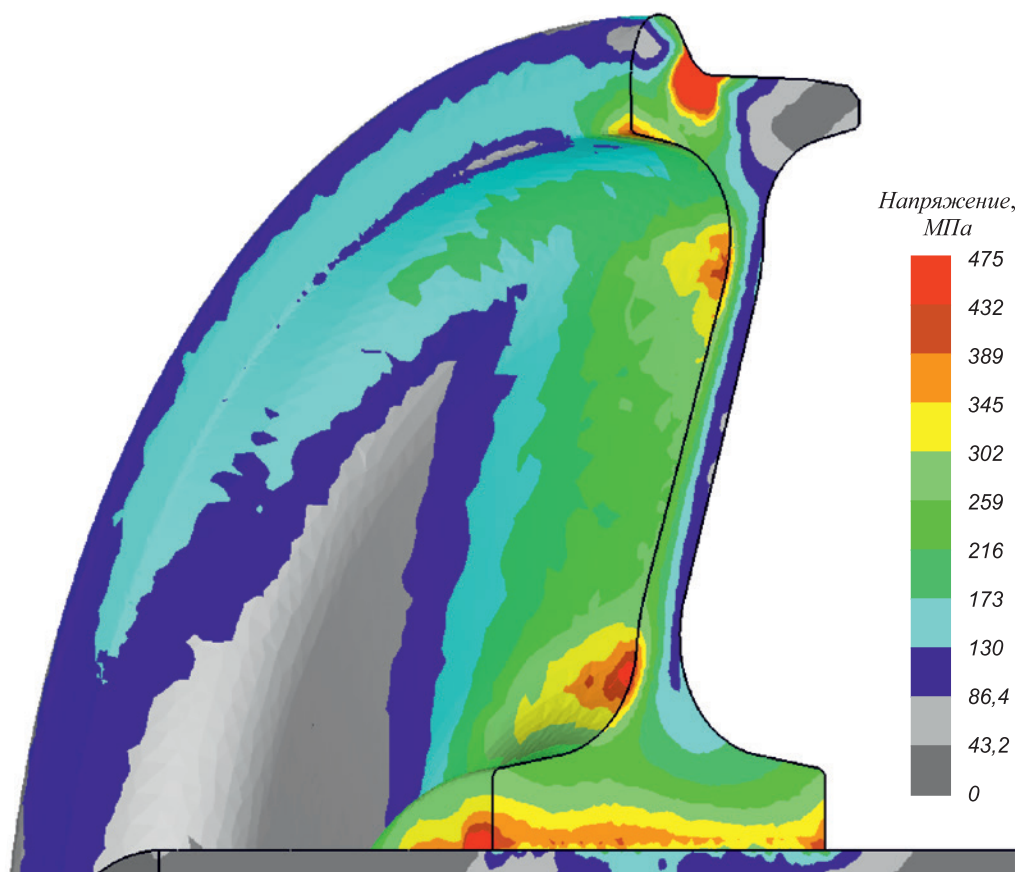
Сторона колеса	Область диска	
	в зоне дуги над ступицей, МПа	в зоне дуги под ободом, МПа
Нагрузка по схеме 1		
Наружная	152 (R171 мм)	149 (R343 мм)
Внутренняя	437 (R172 мм)	399 (R350 мм)
Нагрузка по схеме 2		
Наружная	198 (R189 мм)	111 (R376 мм)
Внутренняя	114 (R186 мм)	148 (R350 мм)
Нагрузка по схеме 3		
Наружная	202 (R189 мм)	257 (R402 мм)
Внутренняя	132 (R146мм)	85 (R346 мм)

Таблица 2

Максимальные эквивалентные напряжения в диске колеса при действии механических эксплуатационных нагрузок с учетом влияния остаточных технологических напряжений

Table 2. Maximum equivalent stresses in the wheel disk under the action of mechanical operating loads taking into account the influence of residual technological stresses

Сторона колеса	Область диска	
	в зоне дуги над ступицей, МПа	в зоне дуги под ободом, МПа
Нагрузка по схеме 1		
Наружная	152 (R171 мм)	155 (R343 мм)
Внутренняя	457 (R172 мм)	417 (R350 мм)
Нагрузка по схеме 2		
Наружная	260 (R189 мм)	107 (R376 мм)
Внутренняя	158 (R183 мм)	162 (R350 мм)
Нагрузка по схеме 3		
Наружная	265 (R184 мм)	239 (R394 мм)
Внутренняя	167 (R183мм)	98 (R345 мм)



Результаты расчета эквивалентных напряжений в диске, полученные при нагружении колеса по схеме 1 с учетом влияния остаточных технологических напряжений

Results of calculating the equivalent stresses in the disk, obtained when the wheel is loaded according to scheme 1 taking into account the influence of residual technological stresses

Следует обратить внимание, что данный факт имеет место в наиболее опасных зонах диска, в которых при эксплуатации в первую очередь зарождаются усталостные трещины. Это, очевидно, не способствует повышению точности прогноза прочностных характеристик колес.

Выводы

Выполнена практическая реализация разработанного метода учета остаточных технологических напряжений при расчетах напряженно-деформированного состояния диска железнодорожного колеса.

Применительно к конструкции колеса диаметром 957 мм с плоскоконическим диском (ГОСТ 10791 – 2011)

выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния диска при действии механических видов эксплуатационной нагрузки. Реализованное при расчетах увеличение натяга между ступицей и осью на 60 % позволило установить, что наличие в колесе остаточных технологических напряжений вызывает повышение на 5 – 38 % максимальных эквивалентных напряжений в наиболее нагруженных при эксплуатации зонах диска.

Таким образом, предлагаемый метод учета остаточных технологических напряжений позволяет получить верхнюю оценку прочностных характеристик колес, а, следовательно, более адекватно прогнозировать срок их эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Liu Yo., Stratman B., Mahadevan S. Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels // *International Journal of Fatigue*. 2006. Vol. 28. No. 7. P. 747–756.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.09.007>
2. Oliver J., Lonsdale C. North American railways combat split wheel rims // *International Railway Journal*. 2014. Vol. 54. No. 5. P. 31–34.
3. Haidaria A., Tehrani P.-H. Thermal load effects on fatigue life of a cracked railway wheel // *Latin American Journal of Solids and*

1. Liu Yo., Stratman B., Mahadevan S. Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels. *International Journal of Fatigue*. 2006. vol. 28, no. 7, pp. 747–756.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.09.007>
2. Oliver J., Lonsdale C. North American railways combat split wheel rims. *International Railway Journal*. 2014, vol. 54, no. 5, pp. 31–34.
3. Haidaria A., Tehrani P.-H. Thermal load effects on fatigue life of a cracked railway wheel. *Latin American Journal of Solids and Struc-*

- Structures. 2015. Vol. 12. No. 6. P. 1144–1157.
<https://doi.org/10.1590/1679-78251658>
4. Okagata Yo. Design technologies for railway wheels and future prospects // *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2013. No. 105. P. 26–33.
5. Bernasconi A., Filippini M., Foletti S., Vaudo D. Multiaxial fatigue of a railway wheel steel under non-proportional loading // *International Journal of Fatigue*. 2006. Vol. 28. No. 5–6. P. 663–672.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.07.045>
6. Masoudi Nejad R., Farhangdoost K., Shariati M. Numerical study on fatigue crack growth in railway wheels under the influence of residual stresses // *Engineering Failure Analysis*. 2015. Vol. 52. P. 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.03.002>
7. Arslan M.A., Kayabasi O. 3-D Rail–Wheel contact analysis using FEA // *Advances in Engineering Software*. 2012. Vol. 45. No. 1. P. 325–331. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.10.009>
8. Mohan P.M. Analysis of railway wheel to study thermal and structural behaviour // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2012. Vol. 3. No. 11. P. 1–4.
9. Makino T., Kato T., Hirakawa K. The effect of slip ratio on the rolling contact fatigue property of railway wheel steel // *International Journal of Fatigue*. 2012. Vol. 36. No. 1. P. 68–79.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.08.014>
10. Zhang M.R., Gu H.C. Fracture toughness of nanostructured railway wheels // *Engineering Fracture Mechanics*. 2008. Vol. 75. No. 18. P. 5113–5121. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.07.007>
11. Keropyan A., Gorbatyuk S., Gerasimova A. Tribotechnical aspects of wheel-rail system interaction // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 564–569. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.517>
12. Кононов Д.П., Шадрин Н.Ю. Повышение безопасности движения железнодорожного транспорта за счет увеличения усталостной прочности цельнокатаных колес // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2014. Вып. 1(10). С. 6–10.
13. Якушев А.В., Кононов Д.П., Комиченко С.О. Результаты определения остаточных технологических напряжений в дисковой части цельнокатаных колес грузовых и пассажирских вагонов методом тензометрии // *Транспорт Российской Федерации*. 2015. № 3(58). С. 66–68.
14. Seo J.W., Kwon S.J., Jun H.K., Lee D.H. Effects of residual stress and shape of web plate on the fatigue life of railway wheels // *Engineering Failure Analysis*. 2009. Vol. 16. No. 7. P. 2493–2507.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.04.013>
15. Sitarz M., Śladowski A., Bizon K., Chruzik K. Designing of railway wheels. Part 1: Finite element method // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2005. Vol. 219. No. 2. P. 91–110.
<https://doi.org/10.1243/095440905X8826>
16. Sitarz M., Śladowski A., Bizon K., Chruzik K. Designing of railway wheels. Part 2: Comparison of numerical analysis and experimental research // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of rail and rapid transit*. 2005. Vol. 219. No. 2. P. 111–120. <https://doi.org/10.1243/095440905X8817>
17. Kiriya K., Okagata Y., Kato T. A study on the fatigue properties of the plate area of Japanese railway wheels // *16th Int. Wheelset Congress*. 2010. 12 p.
18. Atai A.A., Azarlu E. Multi-objective optimization of web profile of rail-way wheel using Bi-directional evolutionary structural optimization // *Journal of Computational Applied Mechanics*. 2017. Vol. 48. No. 2. P. 307–318.
<https://doi.org/10.22059/JCAMECH.2017.237353.160>
19. Яковченко А.В., Снитко С.А. Анализ и совершенствование конструкций колес, удовлетворяющих ГОСТ 10791–2011 // *Сталь*. 2015. № 12. С. 32–38.
20. Пашолок И.Л., Цюренко В.Н., Разумов А.С. Разработка критериев работоспособности дисков цельнокатаных колес для грузовых вагонов нового поколения // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2002. № 3. С. 19–23.
- tures. 2015, vol. 12, no. 6, pp. 1144–1157.
<https://doi.org/10.1590/1679-78251658>
4. Okagata Yo. Design technologies for railway wheels and future prospects. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2013, no. 105, pp. 26–33.
5. Bernasconi A., Filippini M., Foletti S., Vaudo D. Multiaxial fatigue of a railway wheel steel under non-proportional loading. *International Journal of Fatigue*. 2006, vol. 28, no. 5–6, pp. 663–672.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.07.045>
6. Masoudi Nejad R., Farhangdoost K., Shariati M. Numerical study on fatigue crack growth in railway wheels under the influence of residual stresses. *Engineering Failure Analysis*. 2015, vol. 52, pp. 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.03.002>
7. Arslan M.A., Kayabasi O. 3-D Rail–Wheel contact analysis using FEA. *Advances in Engineering Software*. 2012, vol. 45, no. 1, pp. 325–331. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.10.009>
8. Mohan P.M. Analysis of railway wheel to study thermal and structural behavior. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2012, vol. 3, no. 11, pp. 1–4.
9. Makino T., Kato T., Hirakawa K. The effect of slip ratio on the rolling contact fatigue property of railway wheel steel. *International Journal of Fatigue*. 2012, vol. 36, no. 1, pp. 68–79.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.08.014>
10. Zhang M.R., Gu H.C. Fracture toughness of nanostructured railway wheels. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008, vol. 75, no. 18, pp. 5113–5121. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.07.007>
11. Keropyan A., Gorbatyuk S., Gerasimova A. Tribotechnical aspects of wheel-rail system interaction. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 206, pp. 564–569. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.517>
12. Kononov D.P., Shadrina N.Yu. Improving the safety of railway transport by increasing the fatigue strength of solid-rolled wheels. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy*. 2014, no. 1(10), pp. 6–10. (In Russ.).
13. Yakushev A.V., Kononov D.P., Komichenko S.O. Determination of residual technological stresses in the disk part of solid-rolled wheels of freight and passenger cars by tensometric method. *Transport Rossijskoi Federatsii*. 2015, no. 3(58), pp. 66–68. (In Russ.).
14. Seo J.W., Kwon S.J., Jun H.K., Lee D.H. Effects of residual stress and shape of web plate on the fatigue life of railway wheels. *Engineering Failure Analysis*. 2009, vol. 16, no. 7, pp. 2493–2507.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.04.013>
15. Sitarz M., Śladowski A., Bizon K., Chruzik K. Designing of railway wheels. Part 1: Finite element method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2005, vol. 219, no. 2, pp. 91–110.
<https://doi.org/10.1243/095440905X8826>
16. Sitarz M., Śladowski A., Bizon K., Chruzik K. Designing of railway wheels. Part 2: Comparison of numerical analysis and experimental research. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of rail and rapid transit*. 2005, vol. 219, no. 2, pp. 111–120. <https://doi.org/10.1243/095440905X8817>
17. Kiriya K., Okagata Y., Kato T. A study on the fatigue properties of the plate area of Japanese railway wheels. *16th Int. Wheelset Congress*. 2010, 12 p.
18. Atai A.A., Azarlu E. Multi-objective optimization of web profile of rail-way wheel using Bi-directional evolutionary structural optimization. *Journal of Computational Applied Mechanics*. 2017, vol. 48, no. 2, pp. 307–318.
<https://doi.org/10.22059/JCAMECH.2017.237353.160>
19. Yakovchenko A.V., Snitko S.A. Railroad wheels satisfying state standard GOST 10791–2011. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 12, pp. 967–974. <https://doi.org/10.3103/S0967091215120153>
20. Pasholok I.L., Tsyurenko V.N., Razumov A.S. Development of performance criteria of solid-rolled wheels for new generation freight cars. *Vestnik VNIIZhT*. 2002, no. 3, pp. 19–23. (In Russ.).

21. Керенцев Д.Е., Пономарев Ю.К. Влияние остаточных технологических напряжений и тепловых эксплуатационных нагрузок на прочность железнодорожных колес // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14. № 3. Ч. 2. С. 336–344.
22. Сухов А.В., Разумов А.С., Базанов Ю.А., Шиткин С.Л., Гриншпон А.С., Яндимиров А.А. Исследование напряжений в цельнокатаных вагонных колесах повышенной твердости с различной геометрией диска // Metallurg. 2007. № 12. С. 56–60.
23. Цвик Л.Б., Запольский Д.В., Зеньков Е.В., Еремеев В.К. Сравнительный анализ деформирования дисковой части цельнокатаных железнодорожных колес различного конструктивного оформления // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2013. № 4. С. 29–6.
24. Волохов Г.М., Керенцев Д.Е. Развитие методов оценки прочности конструкций цельнокатаных железнодорожных колес и критериев их допуска к эксплуатации // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2013. Т. 2(66). С. 138–154.
25. Керенцев Д.Е. Расчетно-экспериментальная оценка остаточных технологических напряжений в цельнокатаных колесах // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: Сборник тезисов III научно-технического семинара, 6–7 апреля 2016 г., Брянск. Брянск: БГТУ, 2016. С. 32–34.
26. Huang X., Wang X., Shen X., Xiao F. Effect of the shape of railway wheel plate on its stresses and fatigue evaluation // Engineering Failure Analysis. 2019. Vol. 97. P. 718–726. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.063>
27. Срок службы железнодорожных колес // Железные дороги мира. 2003. № 7. С. 48–58.
28. Кушнарев А.В., Киричков А.А., Копцева Н.В., Чукин Д.М., Барышников М.П. Структурно-фазовые превращения при непрерывном охлаждении сталей для цельнокатаных железнодорожных колес / Сталь. 2014. № 4. С. 78–83.
29. Lingamanaik S.N., Chen B.K. Thermo-mechanical modelling of residual stresses induced by martensitic phase transformation and cooling during quenching of railway wheels // Journal of Materials Processing Technology. 2011. Vol. 211. No. 9. P. 1547–1552. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.007>
30. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л. Исследование параметров горячей правки толстых стальных листов на роликовой правильной машине // Metallurg. 2018. № 2. С. 42–45.
31. А. с. 1497242 СССР. Способ изготовления цельнокатаных железнодорожных колес / И.Г. Узлов, А.Ф. Гринев, Н.Г. Мирошниченко и др.; заявл. 11.12.1987; опубл. 30.07.89. Бюл. № 28.
32. Керенцев Д.Е. Повышение конструкционной прочности железнодорожных колес подвижного состава: Дисс. ... канд. техн. наук. Самара, 2016. 173 с.
33. ГОСТ 10791 – 2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия.
34. ГОСТ 33783 – 2016. Колесные пары железнодорожного подвижного состава. Методы определения показателей прочности.
21. Kerentsev D.E., Ponomarev Yu.K. Influence of residual technological stresses and thermal operating loads on the strength of railway wheels. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2015, vol. 14, no. 3, part 2, pp. 336–344. (In Russ.).
22. Sukhov A.V., Razumov A.S., Bazanov Yu.A., Shitkin S.L., Grinshpon A.S., Yandimirov A.A. Study of stresses in hard rolled railcar wheels with a web of different geometry. *Metallurgist*. 2007, vol. 51, no. 11–12, pp. 670–676. <https://doi.org/10.1007/s11015-007-0121-2>
23. Tsvik L.B., Zapol'skii D.V., Zen'kov E.V., Eremeev V.K. Comparative analysis of deformation of disk part of solid-rolled railway wheels with various designs. *Vestnik VNIIZhT*. 2013, no. 4, pp. 29–36. (In Russ.).
24. Volokhov G.M., Kerentsev D.E. Development of methods for assessing the strength of structures of solid-rolled railway wheels and criteria for their admission to operation. *Vestnik VEINII*. 2013, vol. 2(66), pp. 138–154. (In Russ.).
25. Kerentsev D.E. Calculated and experimental assessment of residual technological stresses in solid-rolled wheels. In: *Computer Modeling in Railway Transport: Dynamics, Strength, Wear: Coll. of Theses of III Sci. and Tech. Seminar on April 6–7, 2016*, Bryansk. Bryansk: BSTU, 2016, pp. 32–34. (In Russ.).
26. Huang X., Wang X., Shen X., Xiao F. Effect of the shape of railway wheel plate on its stresses and fatigue evaluation. *Engineering Failure Analysis*. 2019, vol. 97, pp. 718–726. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.063>
27. Service life of railway wheels. *Zheleznnye dorogi mira*. 2003, no. 7, pp. 48–58. (In Russ.).
28. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Koptseva N.V., Chukin D.M., Baryshnikov M.P. Structural and phase transformations in the continuous cooling of steel for one-piece railroad wheels. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 4, pp. 306–311. <https://doi.org/10.3103/S0967091214040123>
29. Lingamanaik S.N., Chen B.K. Thermo-mechanical modelling of residual stresses induced by martensitic phase transformation and cooling during quenching of railway wheels. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, vol. 211, no. 9, pp. 1547–1552. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.007>
30. Maksimov E.A., Shatalov R.L. A study of the parameters for hot straightening of thick steel plates on a roller straightening machine. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 1–2, pp. 132–137. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0635-9>
31. Uzlov I.G., Grinev A.F., Miroshnichenko N.G., etc. *Method of production of solid-rolled railway wheels*. Certificate of authorship USSR no. 1497242. MPK C21 D 9/34. *Bulleten' izobretenii*. 1989, no. 28. (In Russ.).
32. Kerentsev D.E. *Increasing the structural strength of railway rolling stock wheels: Cand. Tech. Sci. Diss.* Samara: 2016, 173 p. (In Russ.).
33. *GOST 10791 – 2011. Solid-rolled wheels. Technical requirements.* (In Russ.).
34. *GOST 33783 – 2016. Wheelsets of railway rolling stock. Methods for determining strength indicators.* (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Александрович Снитко, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением», Донецкий национальный технический университет
ORCID: 0000-0002-1099-5801
E-mail: snitko_sa@mail.ru

Sergei A. Snitko, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair "Metal Forming", Donetsk National Technical University
ORCID: 0000-0002-1099-5801
E-mail: snitko_sa@mail.ru

Александр Васильевич Яковченко, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением», Донецкий национальный технический университет

ORCID: 0000-0002-1099-5801

E-mail: mond1991@mail.ru

Сергей Михайлович Горбатюк, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0002-4368-5965

E-mail: sgor02@mail.ru

Aleksandr V. Yakovchenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Metal Forming”, Donetsk National Technical University

ORCID: 0000-0002-1099-5801

E-mail: mond1991@mail.ru

Sergei M. Gorbatyuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

ORCID: 0000-0002-4368-5965

E-mail: sgor02@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2021

После доработки 17.05.2021

Принята к публикации 28.06.2021

Received 03.03.2021

Revised 17.05.2021

Accepted 28.06.2021