



Оригинальная статья

УДК 629.225.033

DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-337-344



МЕТОД УЧЕТА ОСТАТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДИСКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА. СООБЩЕНИЕ 1

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. Важным аспектом повышения точности прогноза напряженно-деформированного состояния дисков железнодорожных колес при действии эксплуатационных нагрузок является учет остаточных технологических напряжений. Настоящая работа посвящена разработке метода учета остаточных технологических напряжений в дисках колес, который обеспечит универсальность подхода и точность расчетов. Анализ напряжений в диске колеса от действия монтажной (натяга между ступицей и осью) и эксплуатационной нагрузки выполнен на основе результатов конечно-элементного моделирования. Проверка адекватности используемой модели проведена путем сравнения расчетной информации с экспериментальными данными АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». Анализ расчетных и экспериментальных значений радиальных напряжений выполняли для наиболее нагруженных при эксплуатации (опасных) зон диска – зон его сопряжения с ободом и ступицей. Установлено, что заданием величины натяга больше фактической можно получить образование в колесе дополнительных напряжений, которые с достаточной степенью точности отражают влияние остаточных технологических напряжений на напряженно-деформированное состояние диска. На примере расчета колеса с плоскоконическим диском (ГОСТ 10791 – 2011) показано, что увеличение величины натяга на 60 % (с 0,25 до 0,4 мм на диаметр) позволяет адекватно спрогнозировать значения напряжений в наиболее опасных зонах диска. Максимальные относительные отклонения расчетных показателей радиальных напряжений от экспериментальных и по наружной, и по внутренней сторонам колеса, не превышают 14 %. Несмотря на простоту реализации, предлагаемый метод обеспечивает повышение точности прогноза прочностных характеристик колес, а также возможность его использования для различных типоразмеров колес.

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 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 337–344. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-337-344>

Original article

ACCOUNTING METHOD FOR RESIDUAL TECHNOLOGICAL STRESSES IN MODELING THE STRESS-DEFORMED STATE OF A RAILWAY WHEEL DISK. REPORT 1

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 work is devoted to development of a method for accounting residual technological stresses in wheel disks, which will provide both the versatility of the approach and the accuracy of calculations. The analysis of stresses in the wheel disk from the action of assembly (interference between the hub and the axle) and operational loads is carried out on basis of the results of finite element modeling. Verification of adequacy of the used model was made by comparing the calculated information with the experimental data of JSC “VNIIZHT”. The analysis of calculated and experimental values of radial stresses was carried out for the most loaded (critical) zones of the disk during operation – the zones of its interface with the rim and the hub. It was found that by setting the interference fit value to be greater than the actual one, it is possible to obtain the formation of additional stresses in the wheel, which, with a sufficient degree of accuracy, reflect the effect of residual technological stresses on its stress-strain state. On the example of calculating a wheel with a flat-conical disk (GOST 10791 – 2011), it is shown that an increase in the interference fit value by 60 % (from 0.25 mm to 0.4 mm per diameter) makes it possible to adequately predict the magnitude of stresses in the most critical disk elements. The maximum relative deviations of the calculated values of radial stresses from the experimental ones, both along the outer and inner sides of the

wheel, do not exceed 14 %. Despite the simplicity of implementation, the proposed method provides an increase in the accuracy of predicting the strength characteristics of wheels, as well as the possibility of using it for various standard wheel sizes.

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

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 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 337–344. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-337-344>

ВВЕДЕНИЕ

Повышение срока службы железнодорожных колес является актуальной научно-практической задачей [1 – 26]. Эффективность ее решения во многом зависит от точности прогноза напряженно-деформированного состояния (НДС) дисков колес при действии эксплуатационных нагрузок [4, 12 – 26]. Одним из важнейших аспектов при этом выступает необходимость учета остаточных напряжений, которые появляются в штампованно-катаных колесах на различных стадиях их производства и неизбежно вызывают соответствующие изменения НДС дисков колес, от прочности которых существенно зависит эксплуатационный ресурс колеса в целом [12, 13, 21, 24, 25].

В современных условиях анализ НДС колес при различных схемах их нагружения выполняют в системах компьютерного конечно-элементного моделирования по специальным методикам, оговоренным соответствующими нормативными документами [14 – 25]. При этом виды как механических, так и тепловых нагрузок, используемые в различных методиках, в целом подобны, но их значения могут существенно отличаться [24]. Объяснить данный факт можно специфическими условиями эксплуатации колес (рельеф местности, технические характеристики железнодорожного пути и др.), которые характерны для различных регионов мира [27]. Вместе с тем, такой важный фактор, как остаточные технологические напряжения, которые всегда появляются в штампованно-катаных колесах, независимо от технологии их производства, учитывают далеко не всегда [21, 24, 25].

Следует отметить, что расчет остаточных напряжений в диске является достаточно сложной задачей, так как первичное поле остаточных напряжений появляется в колесе в процессе его остывания после прессопрокатной линии, а затем оно меняется при последующих операциях термической и механической обработок колеса, а в ряде случаев и упрочняющей обработки диска дробью. При этом, как известно из практики производства колес, в процессе выполнения вышеуказанных операций происходит необратимое изменение размеров колес. Причем даже для колес в пределах одной партии эти изменения будут отличаться, что связано с технологически допустимым колебанием размеров черновых колес в пределах поля допусков.

При расчете поля остаточных технологических напряжений в готовом чистовом колесе требуется учет

большого количества факторов, определяющих необходимость многостадийного моделирования протекающих в металле физических процессов [21, 24, 28 – 30]. При этом нужно использовать несколько математических моделей и широкий набор свойств материала, которые необходимы для моделирования процессов межфазного преобразования, упругопластической деформации и тепломассопереноса. Нужна и соответствующая база экспериментальной информации для корректного задания начальных и граничных условий при решении краевых задач, а также для оценки адекватности результатов моделирования вышеуказанных технологических операций.

Данные обстоятельства затрудняют интерпретацию и совместимость получаемых на разных этапах моделирования результатов, а также существенно усложняют процесс отладки модели в целом. Очевидно поэтому такой подход не получил широкого распространения в инженерной практике и в соответствующей нормативной документации. Поэтому целью работы является создание метода учета остаточных технологических напряжений в дисках железнодорожных колес, обеспечивающего при моделировании напряженно-деформированного состояния дисков железнодорожных колес универсальность подхода и точность расчетов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно [13, 31, 32], что остаточные технологические напряжения вызывают появление в поверхностных слоях диска напряжений, которые могут, в зависимости от вида и режимов отделочных операций, существенно различаться не только по величине, но и по знаку. Конечно-элементное моделирование НДС колес на каждой стадии отделочных операций, как было отмечено выше, весьма проблематично.

Перед эксплуатацией колеса запрессовывают на ось с натягом. Эта операция вызывает дополнительные напряжения разного знака и величины, показанные на рис. 1. Причем моделирование НДС колес с учетом натяга между ступицей и осью затруднений не вызывает.

Анализ имеющихся данных [13, 31, 32] позволяет сделать вывод о том, что дополнительные напряжения от натяга между ступицей и осью могут быть подобны остаточным технологическим напряжениям в дисках железнодорожных колес. Таким образом, можно пред-

положить, что, назначив при моделировании величину натяга несколько большую, чем требуется, можно получить образование в колесе дополнительных напряжений, которые с достаточной степенью точности будут

отражать влияние остаточных технологических напряжений на НДС диска колеса.

Для проверки данной гипотезы была выбрана конструкция колеса диаметром 957 мм с плоскоконическим диском [33], которое наиболее широко используется на железных дорогах стран СНГ и характеристики которого на данный момент наиболее полно изучены.

Анализ НДС колеса выполняли путем конечно-элементного моделирования в системе DEFORM 3D. При этом решали объемную задачу для 1/2 колеса. Точность моделирования геометрии колеса и учет неравномерности распределения напряжений в колесе при его нагружении обеспечены путем измельчения сетки конечных элементов в диапазоне 1,5 – 4,5 мм в зонах дуг окружностей диска, а также дуг сопряжения диска с ободом и ступицей. Как показали расчеты, дальнейшее измельчение сетки нецелесообразно, так как это дает уточнение результатов не более, чем на 5 МПа при существенном увеличении времени расчета.

В качестве материала колеса из библиотеки DEFORM 3D выбрана высокоуглеродистая сталь: модуль Юнга – 210 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,3. Тип объекта – упругий.

Адаптация методики конечно-элементного моделирования выполнялась применительно к условиям экспериментальных исследований НДС колес, выполненных в АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ВНИИЖТ) на специализированной испытательной машине [16]. При этом были учтены:

- жесткая заделка отверстия ступицы;
- натяг при запрессовке колеса на ось;
- обточка обода до толщины 22 мм.

Величина натяга между ступицей и осью составляла 0,25 мм на диаметр [34].

Проверка адекватности используемой конечно-элементной модели выполнена путем сравнения расчетной информации с экспериментальными данными АО «ВНИИЖТ», полученными для случая приложения вертикальной нагрузки 800 кН к гребню колеса. При этом сравнивали величины радиальных напряжений в диске по наружной и внутренней поверхностям колеса (рис. 1).

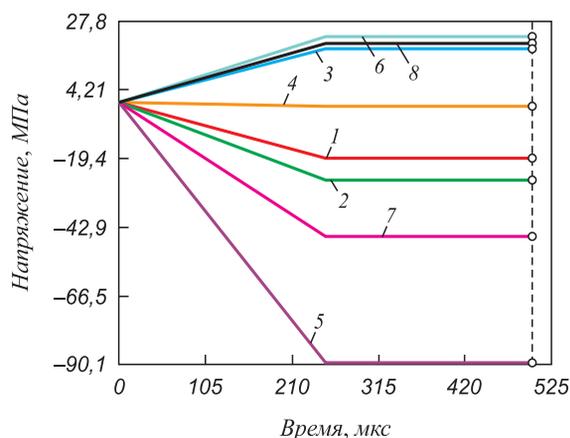
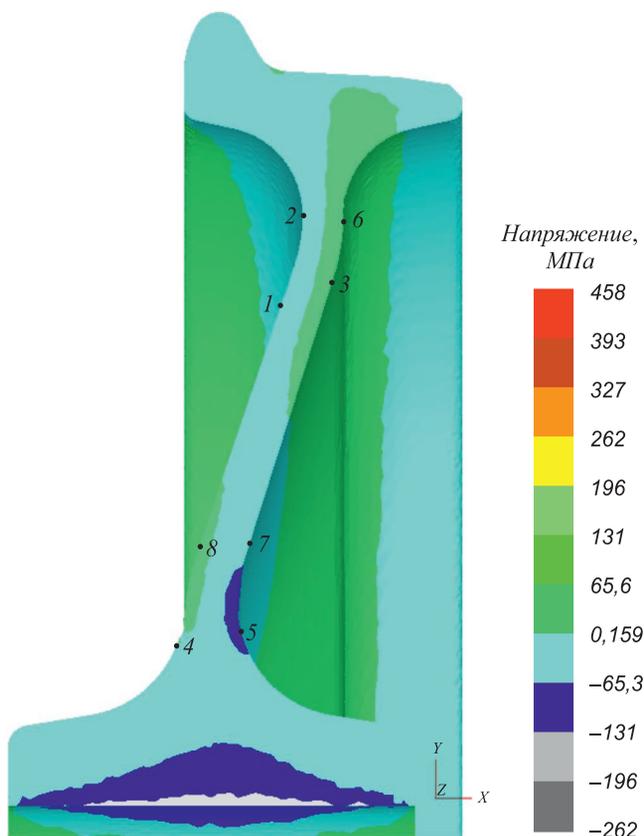


Рис. 1. Результаты расчета радиальных напряжений в диске стандартного колеса с плоскоконическим диском (ГОСТ 10791 – 2011), полученные путем конечно-элементного моделирования натяга 0,25 мм (с учетом обточки обода до толщины 22 мм), МПа:
 1 – –19,5; 2 – –27,0; 3 – 18,1; 4 – –1,75; 5 – –90,1;
 6 – 22,2; 7 – –46,6; 8 – 19,6

Fig. 1. Results of calculating the radial stresses in the disk of standard wheel with a flat-conical disk (GOST 10791 – 2011), obtained by finite element modeling of interference fit of 0.25 mm (taking into account turning the rim to a thickness of 22 mm), MPa:
 1 – –19.5; 2 – –27.0; 3 – 18.1; 4 – –1.75; 5 – –90.1;
 6 – 22.2; 7 – –46.6; 8 – 19.6

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений радиальных напряжений (табл. 1) выполняли для наиболее нагруженных (опасных) при эксплуатации зон диска. Это зоны его сопряжения с ободом и ступицей. Для получения более объективной и полной информации значения напряжений фиксировали с наружной и внутренней сторон колеса в четырех точках, по две точки на каждую опасную зону диска (рис. 2).

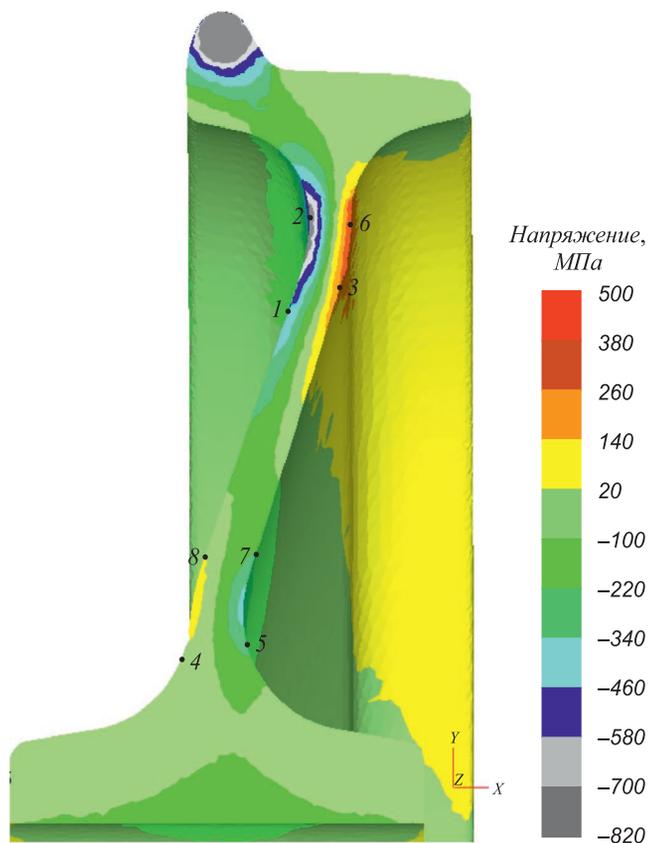


Рис. 2. Результаты расчета радиальных напряжений в диске стандартного колеса, полученных от вертикальной нагрузки на гребень и натяга 0,25 мм, МПа:
1 – -471; 2 – -804; 3 – 285; 4 – -11,2; 5 – -280; 6 – 373; 7 – -228; 8 – 22,6

Fig. 2. Results of calculating the radial stresses in the disk of standard wheel, obtained from vertical load on the flange and interference fit of 0.25 mm, MPa:
1 – -471; 2 – -804; 3 – 285; 4 – -11.2; 5 – -280; 6 – 373; 7 – -228; 8 – 22.6

Как показал анализ полученных результатов моделирования (табл. 1), расчетные значения напряжений на качественном уровне (знак напряжения) в целом соответствуют экспериментальным данным. Однако, как видно из табл. 1, полученные максимальные отклонения, во-первых, весьма существенны, а, во-вторых,

дают заниженную оценку напряжений в опасных зонах диска.

Выполненная серия аналогичных расчетов с различными величинами натяга позволила установить, что для данного типа колеса и условий нагружения за-

Таблица 1

Результаты сравнения расчетных значений радиальных напряжений в диске, полученных от вертикальной нагрузки на гребень и натяга 0,25 мм, с экспериментальными данными

Table 1. Results of comparing the calculated values of radial stresses in the disk, obtained from vertical load on the flange and interference fit of 0.25 mm, with experimental data

Номер точки	Экспериментальное значение напряжения, σ_3 , МПа	Расчетное значение напряжения, σ_r , МПа	Относительное отклонение, $\Delta = \frac{ \sigma_3 - \sigma_r }{\sigma_3} 100\%$
1	-472	-471	0,2
2	-802	-804	-0,2
3	345	285	17,4
4	-11	-11,2	-1,8
5	-318	-280	11,9
6	375	373	0,5
7	-250	-228	8,8
8	30,4	22,6	25,7

Таблица 2

Результаты сравнения расчетных значений радиальных напряжений в диске, полученных от вертикальной нагрузки на гребень и натяга 0,4 мм, с экспериментальными данными

Table 2. Results of comparing the calculated values of radial stresses in the disk, obtained from vertical load on the flange and interference fit of 0.4 mm, with experimental data

Номер точки	Экспериментальное значение напряжения, σ_3 , МПа	Расчетное значение напряжения, σ_r , МПа	Относительное отклонение, $\Delta = \frac{ \sigma_3 - \sigma_r }{\sigma_3} 100\%$
1	-472	-483	-2,3
2	-802	-820	-2,2
3	345	296	14,2
4	-11	-12,2	-10,9
5	-318	-334	-5,0
6	375	386	-2,9
7	-250	-256	-2,4
8	30,4	34,3	-12,8

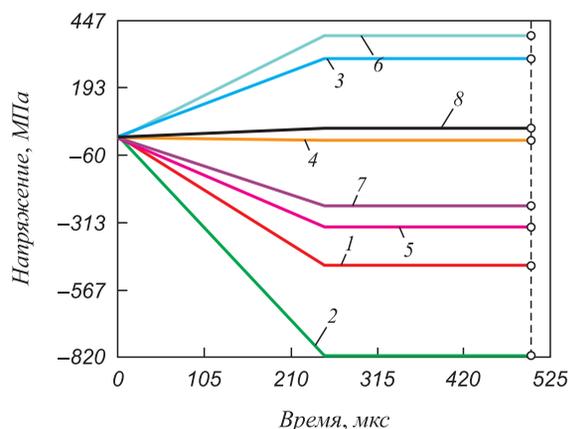
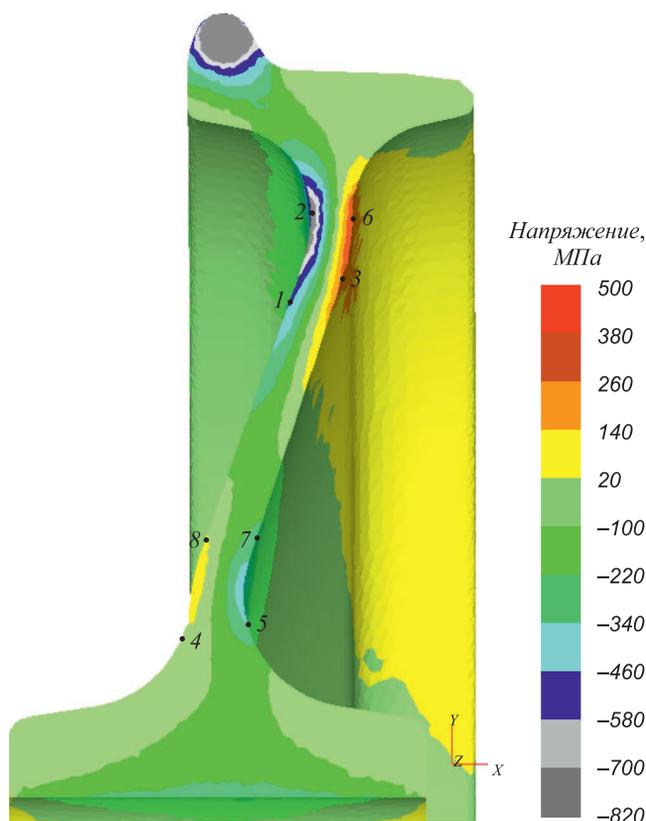


Рис. 3. Результаты расчета радиальных напряжений в диске стандартного колеса, полученных от вертикальной нагрузки на гребень и натяга 0,4 мм, МПа:
 1 – -483; 2 – -820; 3 – 296; 4 – -12,2; 5 – -334;
 6 – 386; 7 – -256; 8 – 34,3

Fig. 3. Results of calculating the radial stresses in the disk of standard wheel, obtained from vertical load on the flange and interference fit of 0.4 mm, MPa:
 1 – -483; 2 – -820; 3 – 296; 4 – -12.2; 5 – -334;
 6 – 386; 7 – -256; 8 – 34.3

дание натяга 0,4 мм на диаметр (т. е. на 60 % больше требуемого) обеспечивает получение хорошего соответствия расчетных и экспериментальных значений напряжений не только на качественном, но и количественном уровне (рис. 3, табл. 2). Причем, как показывает сравнительный анализ табл. 1 и 2, в этом случае имеет место верхняя оценка напряжений в опасных зонах диска, что, безусловно, является положительным моментом.

Таким образом, задание при моделировании большего натяга между ступицей и осью позволяет получить в колесе дополнительные напряжения, которые с достаточной степенью точности отражают влияние остаточных технологических напряжений на НДС диска колеса.

Выводы

Разработан метод учета остаточных технологических напряжений при моделировании напряженно-деформированного состояния дисков железнодорожных колес. Сущность метода заключается в задании при расчете величины натяга между ступицей и осью больше фактической. Это позволяет получить в колесе дополнительные напряжения, которые с достаточной степенью точности отражают влияние остаточных технологических напряжений на НДС диска колеса.

На примере расчета НДС колеса с плоскоконическим диском (ГОСТ 10791 – 2011) показано, что увеличение величины натяга между ступицей и осью на 60 % (с 0,25 до 0,4 мм на диаметр) позволяет адекватно спрогнозировать величины напряжений в наиболее нагруженных при эксплуатации зонах диска. Максимальные относительные отклонения расчетных значений радиальных напряжений от экспериментальных и по наружной, и по внутренней сторонам колеса не превышают 14 %.

Практическая реализация предлагаемого метода достаточно проста и не требует проведения широкомасштабных теоретических и экспериментальных исследований. При этом метод обеспечивает повышение точности прогноза прочностных характеристик колес, а также универсальность подхода – возможность использования для различных типоразмеров колес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 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>
- Oliver J., Lonsdale C. North American railways combat split wheel rims // *International Railway Journal*. 2014. Vol. 54. No. 5. P. 31–34.
- Haidaria A., Tehrani P.-H. Thermal load effects on fatigue life of a cracked railway wheel // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2015. Vol. 12. No. 6. P. 1144–1157. <https://doi.org/10.1590/1679-78251658>
- Okagata Yo. Design technologies for railway wheels and future prospects // *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2013. No. 105. P. 26–33.
- 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>
- 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>
- 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>
- 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.
- 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>
- 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>
- 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>
- Кононов Д.П., Шадрина 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.
- 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.
- 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>
- Sitarz M., Ślaskowski 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>
- Sitarz M., Ślaskowski 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>
- Kiriyama 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.
- Atai A.A., Azarlu E. Multi-objective optimization of web profile of rail-way wheel using Bi-directional evolutionary structural op-
- 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>
- Oliver J., Lonsdale C. North American railways combat split wheel rims. *International Railway Journal*. 2014, vol. 54, no. 5, pp. 31–34.
- Haidaria A., Tehrani P.-H. Thermal load effects on fatigue life of a cracked railway wheel. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2015, vol. 12, no. 6, pp. 1144–1157. <https://doi.org/10.1590/1679-78251658>
- Okagata Yo. Design technologies for railway wheels and future prospects. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2013, no. 105, pp. 26–33.
- 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>
- 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>
- 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>
- 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.
- 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>
- 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>
- 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>
- 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.).
- 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.).
- 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>
- Sitarz M., Ślaskowski 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>
- Sitarz M., Ślaskowski 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>
- Kiriyama 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.
- Atai A.A., Azarlu E. Multi-objective optimization of web profile of rail-way wheel using Bi-directional evolutionary structural optimi-

- timization // *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.
 21. Керентцев 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 // *Металлург*. 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., Керентцев 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. Керентцев 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 // *Металлург*. 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. Керентцев 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.
 - zation. *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. 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. *Zheleznye 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

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

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

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 04.03.2021

Принята к публикации 16.04.2021

Received 03.03.2021

Revised 04.03.2021

Accepted 16.04.2021