

УДК 669.018.294:620.19

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.010920.32.651

## КОРРОЗИЯ ИЗНОШЕННЫХ ОБОДЬЕВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

ГУБЕНКО С. И.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
БЕСПАЛЬКО В. Н.<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1\*</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2184-8230

**Аннотация.** *Цель.* Необходимы исследования условий зарождения усталостных повреждений и ослабляющего действия коррозии на коррозионно-усталостный износ железнодорожных колес. Целью работы было изучение влияния структуры колесной стали на развитие коррозионных процессов. *Методика.* Для исследования особенностей развития коррозионных повреждений в колесной стали использовали металл изношенных колес (1, 2; образцы с поверхности катания, из внутренней части тела обода и из диска). Ускоренные коррозионные испытания проводили при комнатной температуре в специальной камере во влажной атмосфере (относительная влажность 80...83 %), содержащей 10 мг/м<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>, а также NO и NO<sub>2</sub>, что близко к действию промышленных атмосфер. Металлографические исследования проводили на микроскопе «Неофот-21». *Результаты.* Исследованы особенности коррозии колесной стали в разных участках изношенных железнодорожных колес. Показано, что разная скорость коррозии колесной стали объясняется ее различным структурным состоянием (степень дисперсности перлите, размеры зерен, характер деформированной структуры). Установлено, что поверхность катания и металл диска корродировали быстрее, чем металл из центральной части обода. *Научная новизна.* Установлены особенности механизма и скорости развития коррозии колесной стали в разных участках изношенных железнодорожных колес при скоростных испытаниях в среде, близкой к промышленной атмосфере. Показано, что на скорость коррозии влияет характер микроструктуры колесной стали. Показано, что в отработанных колесах поверхность катания корродировала быстрее, чем металл из центральной части обода, что объясняется влиянием напряжений, созданных пластической деформацией в тонком поверхностном слое. Установлено, что участки «белого слоя» на поверхности катания способствуют замедлению коррозии, что связано с его ультрадисперсной структурой. Показано, что металл диска корродировал быстрее, чем металл из центральной части обода благодаря более грубой феррито-перлитной структуре диска и наличию ферритной полосчатости. *Практическая значимость.* Использование полученных результатов позволит разработать противокоррозионные мероприятия для железнодорожных колес, что позволит предупредить образование различного рода дефектов при их эксплуатации.

**Ключевые слова:** *железнодорожное колесо; микроструктура стали; коррозия; усталостно-коррозионное разрушение*

## КОРОЗИЯ ЗНОШЕНИХ ОБОДІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

ГУБЕНКО С. І.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
БЕСПАЛЬКО В. М.<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2184-8230

**Аноація.** *Мета.* Необхідні дослідження умов зародження втомних пошкоджень і послаблюючої дії корозії на корозійно-втомний знос залізничних коліс. Метою роботи було вивчення впливу структури колісної сталі на розвиток корозійних процесів. *Методика.* Для дослідження особливостей розвитку корозійних пошкоджень в колісній сталі використовували метал зношених коліс (1, 2; зразки з поверхні ковзання, з внутрішньої частини тіла ободу і з диску). Прискорені корозійні випробування проводили при кімнатній температурі в спеціальній камері у вологій атмосфері (відносна вологість 80...83 %), що містить 10 мг/м<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>, а також NO і NO<sub>2</sub>, що близько до дії промислових атмосфер. Металографічні дослідження проводили на мікроскопі «Неофот-21». *Результати.* Досліджено особливості корозії колісної сталі в різних ділянках зношених залізничних коліс. Показано, що різна швидкість корозії колісної сталі пояснюється її різним

структурним станом (ступінь дисперсності перліту, розміри зерен, характер деформованої структури). Встановлено, що поверхня ковзання і метал диску кородували швидше, ніж метал з центральної частини ободу. **Наукова новизна.** Встановлено особливості механізму та швидкості розвитку корозії колісної сталі в різних ділянках зношених залізничних коліс при швидкісних випробуваннях у середовищі, близькому до промислової атмосфери. Показано, що на швидкість корозії впливає характер мікроструктури колісної сталі. Показано, що у зношених колесах поверхня ковзання кородує швидше, ніж метал з центральної частини ободу, що пояснюється впливом напружень, створених пластичною деформацією в тонкому поверхневому шарі. Встановлено, що ділянки «білого шару» на поверхні ковзання сприяють уповільненню корозії, що пов'язано з його ультрадисперсною структурою. Показано, що метал диску кородує швидше, ніж метал з центральної частини ободу завдяки більш грубій ферито-перлітній структурі диска і наявності феритної смугастості. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить розробити протикорозійні заходи для залізничних коліс, що дозволить попередити утворення різного роду дефектів при їх експлуатації.

**Ключові слова:** залізничне колесо; мікроструктура сталі; корозія; втомно-корозійне руйнування

## CORROSION OF WORN OUT RAILWAY WHEELS

GUBENKO S.I.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
BESPALKO V.M.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1\*</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2184-8230

**Abstract. Purpose.** It is necessary to study the conditions for the initiation of fatigue damages and the weakening effect of corrosion on the corrosion-fatigue wear of railway wheels. The aim of the work was to study the effect of the structure of wheel steel on the development of corrosion processes. **Methods.** To study the features of the development of corrosion damages in wheel steel the metal of worn wheels (1, 2; samples from the rolling surface, from the inner part of the rim body and from the disk) was used. Accelerated corrosion tests were carried out at room temperature in a special chamber in a humid atmosphere (relative humidity 80...83 %) containing 10 mg/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>, as well as NO and NO<sub>2</sub>, which is close to the effect of industrial atmospheres. Metallographic studies were carried out using a Neophot-21 microscope. **Results.** The features of wheel steel corrosion in different areas of worn out railway wheels are investigated. It is shown that the different corrosion rate of wheel steel is explained by its different structural state (degree of dispersion of pearlite, grain size, nature of the deformed structure). It was found that the rolling surface and the metal of the disc corroded faster than the metal from the center of the rim. **Scientific novelty.** The features of the mechanism and the rate of development of corrosion of wheel steel in different areas of worn out railway wheels during high-speed tests in an environment close to an industrial atmosphere are established. It is shown that the nature of the microstructure of wheel steel affects the corrosion rate. It is shown that in used wheels the rolling surface corroded faster than the metal from the central part of the rim, which is explained by the effect of stresses created by plastic deformation in a thin surface layer. It was found that the areas of the "white layer" on the rolling surface contribute to the slowdown of corrosion, which is associated with its ultradispersed structure. It was shown that the metal of the disk corroded faster than the metal from the central part of the rim due to the coarser ferrite-pearlite structure of the disk and the presence of ferritic banding. **Practical significance.** The use of the results obtained will allow developing anti-corrosion measures for railway wheels, which will prevent the formation of various types of defects during their operation.

**Keywords:** railway wheel; steel microstructure; corrosion; fatigue-corrosion failure

**Введение.** Возможность обеспечения высокого уровня прочности, долговечности и эксплуатационной надежности железнодорожных колес определяется не только химическим составом и структурой колесной стали, а также структурными и фазовыми изменениями в процессе их эксплуатации [1–10]. Проблема коррозионного разрушения железнодорожных колес привлекала внимание

исследователей, которые отмечают важность этой проблемы с точки зрения влияния коррозионных процессов на надежность и долговечность железнодорожных колес при эксплуатации [11; 12]. В работе [13] определены зоны максимальных коррозионных повреждений, приведены результаты экспериментов на образцах колесной стали R7 в коррозионных средах. Изучали условия зарождения

усталостных повреждений и ослабляющее действие коррозии на уровень механических свойств колесной стали.

**Целью работы** – изучение влияния структуры колесной стали на развитие коррозионных процессов.

**Материалы и методы исследований.**

Для исследования особенностей развития коррозионных повреждений в колесной стали использовали металл изношенных колес (1, 2; образцы с поверхности катания, из внутренней части тела обода и из диска). Ускоренные коррозионные испытания проводили при комнатной температуре в специальной камере во влажной атмосфере (относительная влажность 80...83 %), содержащей 10 мг/м<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>, а также NO и NO<sub>2</sub>, что близко к действию промышленных атмосфер. Металлографические исследования проводили на микроскопе «Неофот-21».

**Результаты и обсуждение.**

Структурные изменения, произошедшие вблизи поверхности катания при эксплуатации колес 1 и 2, обусловили различное поведение стальных образцов при коррозионных испытаниях. Образцы от колеса 1 корродировали с различной

скоростью, которая уменьшалась от выкружки по ширине обода и лишь у самого края в зоне наплыва вновь возросла (рис. 1, кривая 1). Тонкие обрывки «белого слоя» прокорродировали очень быстро и в структуре образцов после испытаний не обнаружены.

В зоне выкружки, где поверхностный слой стали претерпел довольно значительную деформацию, скорость коррозии была максимальной, а механизм ее носил очаговый характер (рис. 2 а). При переходе к средней части поверхности катания характер коррозии изменяется на пленочный (рис. 2 б). В зоне наплыва скорость коррозии вновь возрастает (рис. 1, кривая 1), а ее механизм вновь становится очаговым (рис. 2 в). Таким образом, неравномерная по ширине обода пластическая деформация, проходившая в процессе эксплуатации, способствует неравномерному коррозионному разрушению поверхности катания. Образцы изношенного колеса 2 также корродировали с различной скоростью, которая монотонно уменьшалась от зоны выкружки по ширине обода (рис. 1, кривая 2).

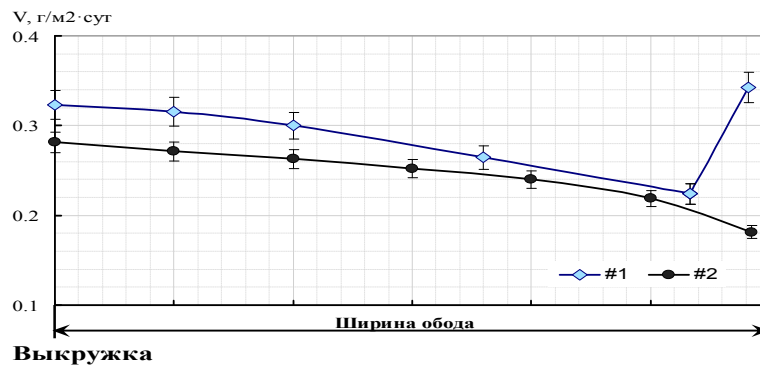


Рис. 1. Изменение скорости коррозии  $V$  образцов стали, отобранных от поверхности катания по ширине ободьев (кривая 1) и (кривая 2)

Коррозия образцов, вырезанных из середины обода отработанных колес 1 и 2, проходила по очаговому механизму (рис. 2 з, д). Размеры очагов коррозии в этих случаях довольно значительны (до 1...2 мм). Скорость коррозии металла ободьев, имеющих ферритно-перлитную структуру, у колес 1 и 2 примерно одинакова и выше скорости коррозии образцов стали из поверхности катания (табл. 1).

Металл диска колес корродировал быстрее, чем металл из центра обода (табл. 1). Процесс коррозии распространялся, в основном, по перлитным участкам (рис. 2 е), а также по границам феррит–перлит. Механизмы коррозии металла из диска и обода различны. Если во внутренних областях обода он имеет крупноочаговый характер, то в диске в поверхностном слое возникло множество мелких очагов. От оксидов в сталь распространялись межкристаллитные

трещины по перлиту и межфазным границам феррит – перлит. Скорость

коррозии диска у колеса 1 несколько выше, чем у колеса 2.

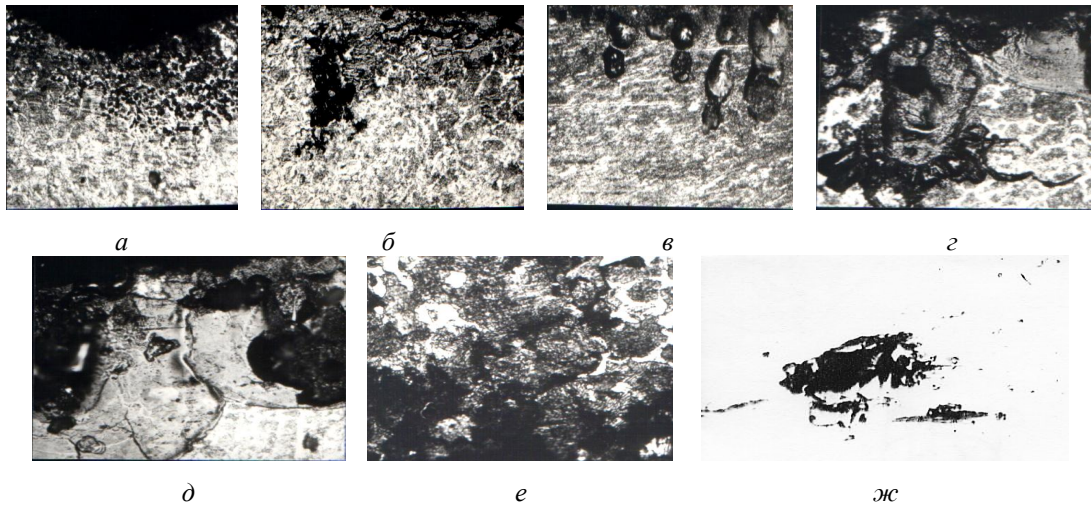


Рис. 2. Микроструктура стали (колесо 1) после коррозионных испытаний в разных участках по ширине обода (а – в, ж), из середины ободьев колес 1 (г) и 2 (д) и диска колеса 2 (е): а – в, д –  $\times 200$ , г, е –  $\times 400$

Таблица 1

**Результаты коррозионных испытаний**

Колесо №	Место анализа	Микроструктура стали	Привес, г	Площадь грани, см <sup>2</sup>	Показатели коррозии		
					$K_1$ , г/м <sup>2</sup>	$K_2$ , г/м <sup>2</sup> сут.	$h$ , мкм
1	Середина поверхности катания	Вытянутые зерна феррита и перлита	0,0186	1,09	24,058	0,408	222
2	Середина поверхности катания	«белый слой»	0,0266	2,0	22,9643	0,359	204
1	Центр обода	Равноосные зерна феррита и перлита	0,0618	2,7	13,3	0,225	140
2	Центр обода	Равноосные зерна феррита и перлита	0,0643	2,80	17,0642	0,289	125
1	Диск	Феррит и перлит полосчатость	0,0830	3,45	21,7702	0,389	166
2	Диск	Феррит и перлит, нет полосчатости	0,0701	3,22	22,8889	0,368	159

При наличии неметаллических включений, они становятся концентраторами напряжений [11; 12; 14–25] и центрами зарождения коррозионных повреждений (рис. 2 ж), причем здесь велика роль межфазных границ включение – матрица стали и внутренних границ в гетерофазных включениях [26–32].

**Выводы.** В отработанных колесах поверхность катания корродировала

быстрее, чем металл из центральной части обода, что объясняется влиянием напряжений, созданных пластической деформацией. Участки «белого слоя» способствуют замедлению коррозии, что связано с его ультрадисперсной структурой. Металл диска корродировал быстрее, чем металл из центральной части обода благодаря более грубой структуре диска и наличию ферритной полосчатости.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Воробьев А. А., Губенко С. И., Иванов И. А. и др. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог. Москва : ИНФРА-М, 2011. 264 с.
2. Taran Yu. N., Esaulov V. P., Gubenko S. I. Increase of wear-resistance of railway wheels with different profile of tread. *Metallurgical and Mining Industry*. 2000. № 2. Pp. 42–44.
3. Богданов А. Ф., Губенко С. И., Жуков Д. А., Иванов И. А. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства обода цельнокатаного колеса. Конструкционно-технологическое обеспечение надежности колес рельсовых экипажей : сб. науч. тр. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2009. С. 15–23.
4. Sladkowski A., Gubenko S., Pogorelov D., Iwnicki S., Licciardello R.V. Rail vehicle dynamics and associated problems : monograph. Gliwice : Silesian University of Technology. 2005. 187 p.
5. Таран Ю. Н., Губенко С. И., Алимов А. А., Есаулов В. П. Структурные изменения в ободьях железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1989. № 9. С. 101–105.
6. Губенко С. И., Иванов И. А., Соболев А. А. Особенности износа поверхности катания цельнокатаных колес. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. Санкт-Петербург : изд-во ПГУПС, 2013. С. 73–84.
7. Кушнер В. С., Кутько А. А., Воробьев А. А., Губенко С. И., Иванов И. А. Влияние структуры и механических характеристик колесных стальных пар на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар. Омск : изд-во ОмSTU, 2015. 221 с.
8. Губенко С. И. Некоторые структурные аспекты колесной стали, определяющие качество железнодорожных колес. Современные технологии производства транспортного металла. Россия, Нижний Тагил : изд. НМТК, 2008. 394 с. С. 88–113.
9. Sladkovsky A., Yessaulov V., Shmurygin N., Taran Y., Gubenko S. An Analysis of Stress and Strain in Freight Car Wheels. *Transactions on Modelling and Simulation*. 1997. № 16. Pp. 15–24.
10. Gubenko S., Proidak Yu. Investigation of wear mechanism of tread during operation of railway wheels. *Transport problems*. 2012. № 7. Pp. 119–125.
11. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Микронеоднородная деформация стали, содержащей неметаллические включения. *Известия АН СССР. Металлы*. 1981. № 4. С. 94–97.
12. Gubenko S., Proidak Yu., Kozlovsky A., Shramko A., Iskov M. Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels. *Telematics, Logistics and Transport Safety : Materials of VIII Scientific Conference TLTS'08*. Poland, Katowice-Cieszyn, 2008, October 16–18.
13. Beretta S., Carboni M., LoConte A. Impact of corrosion upon fatigue properties of steel. The 15-th International Wheelset Congress (October 2007). Praha, Chesh. Repub. 2007. Pp. 294–300.
14. Губенко С. И. Неметаллические включения и прочность сталей: монография. Германия, Саарбрюкен (Saarbrücken) : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015. 476 с.
15. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений. Днепропетровск : изд. НМетАУ, ИЦ Системные технологии, 2014. 301 с.
16. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Деформация неметаллических включений при прокатке стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1983. № 4. С. 80–84.
17. Губенко С. И. Межфазные границы включения – матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение – матрица и свойства сталей. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2017. 506 с.
18. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016. 549 с.
19. Губенко С. И. К вопросу о строении межфазных границ неметаллическое включение – матрица в стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1994. № 6. С. 105–112.
20. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозитные включения в сталях. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2019. 330 с.
21. Губенко С. И., Беспалько В. Н. Особенности коррозии колесной стали. Actual trends of modern scientific research : The 1st International scientific and practical conference (July 19–21, 2020). MDPC Publishing, Munich, Germany, 2020. 379 p. Pp. 154–160.
22. Губенко Светлана. Физическая природа пластичности и упрочнения металлов при деформации. Germany – Mauritius, Beau Bassin. LAP LAMBERT academic publishing, 2020. 341 p.
23. Губенко С. И. Трещинообразование в ободьях железнодорожных колес в процессе эксплуатации. Modern science: problems and innovations : The 5th International scientific and practical conference (July 26–28, 2020). SSPG Publish, Stockholm, Sweden, 2020. Pp. 125–131.
24. Ноздрин В. Ф., Ушеренко С. М., Губенко С. И. О механизме упрочнения металлов при сверхглубоком проникании высокоскоростных частиц. *Физика и химия обработки материалов*. 1991. № 6. С. 19–24.

25. Ушеренко С. М., Ноздрин В. Ф., Губенко С. И. Изменение структуры металлической мишени при высокоскоростном внедрении дисперсных частиц. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1991. № 6. С. 34–36.
26. Губенко С. И., Пинчук С. И., Белая Е. В. Влияние структурного состояния колесной стали на развитие коррозии. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 2. С. 69–73.
27. Gubenko S. I., Pinchuk S. I., Belaya E. V. System study of wear mechanism of railway wheel tread surface. *Metallurgical and Mining Industry*. 2010. № 2 (1). Pp. 51–56.
28. Губенко С. И., Пинчук С. И., Белая Е. В. Влияние структурного состояния колесной стали на развитие коррозии. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 2. С. 69–73.
29. Губенко С. И., Пинчук С. И., Белая Е. В. Исследование влияния неметаллических включений на коррозионное поведение колесной стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 7. С. 70–74.
30. Gubenko S. I., Pinchuk S. I., Belaya E. V. Investigation of non-metallic inclusion effect on corrosion behavior of wheel steel. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. № 3 (2). Pp. 63–66.
31. Pinchuk S., Gubenko S., Belaya E. *Correlation between electrochemical corrosion and structural state of steel by simulation of operation conditions of railway wheels*. *Chemistry & Chemical Technology*. 2010. № 4 (2). Pp. 151–158.
32. Губенко С. И., Беспалько В. Н. Уровень пластичности мультифазных включений в сталях. Innovative development of science and education : тр. IV Междунар. науч.-практич. конф. ISGT Publishing House, Athens, Greece, 21–23 June 2020. С. 117–123.

## REFERENCES

1. Vorobiov A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A. and etc. *Resurs I remontprigodnost kolesnih par podvixhnogo sostava zheleznih dorog* [Resource and maintainability of wheel sets of rolling stock of railways]. Moscow: INFRA-M, 2011, 264 p. (in Russian).
2. Taran Yu.N., Esaulov V.P. and Gubenko S.I. *Povishenie iznosostojkosti zheleznodorozhnykh koles s raznim profilem poverhnosti kataniy* [Increasing the wear resistance of railway wheels with a different tread profile]. *Metallurgical and mining industry*. 2000, no. 2, pp. 42–44. (in Russian).
3. Bogdanov A.F., Gubenko S.I., Zhukov D.A. and Ivanov I.A. *Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnyye svoystva oboda tsel'nokatanogo kolesa* [The surface layer and the operational properties of the rim of a seamless-rolled wheel]. *Konstrukcionno-tehnologicheskoe obespechenie nadezhnosti koles rel'sovykh ekipazhej : sb. nauch. tr.* [Structural and technological support for the reliability of the wheels of rail crews : coll. scientific works]. Saint-Petersburg : PGUPS Publ., 2009, pp. 15–23. (in Russian).
4. Sladkowski A., Gubenko S., Pogorelov D., Iwnicki S. and Licciardello R.V. Rail vehicle dynamics and associated problems: monograph. Gliwice : Silesian University of Technology, 2005, 187 p.
5. Taran Yu.N., Esaulov V.P. and Gubenko S.I. *Strukturnie izmeneniya v obodiah zheleznodorozhnykh koles s raznim profilem poverhnosti kataniya* [Structural changes in the rims of railway wheels with a different tread d profile]. *zvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of universities. Ferrous metallurgy]. 1989, no. 9, pp. 101–105. (in Russian).
6. Gubenko S.I., Ivanov I.A. and Sobolev A.A. *Osobennosti iznosa poverkhnosti kataniya tsel'nokatanykh koles* [Features of wear of the rolling surface of solid-rolled wheels]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobscheniya* [Proceedings of the Saint-Petersburg University of Railway Engineering]. Saint-Petersburg : Publishing House of State University of Railway Transport, 2013, pp. 73–84. (in Russian).
7. Kushner V.S., Kutko A.A., Vorobyov A.A., Gubenko S.I. and Ivanov I.A. *Vliyaniye struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh staley na iznashivaniye i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par* [The influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on wear and restoration modes of the wheelset profile]. Omsk : OmSTU Publ., 2015, 221 p. (in Russian).
8. Gubenko S.I. *Nekotoryye strukturnyye aspekty kolesnoy stali, opredelyayushchiye kachestvo zheleznodorozhnykh koles* [Some structural aspects of wheel steel that determine the quality of railway wheels]. *Sovremennyye tehnologii proizvodstva transportnogo metalla* [Modern technologies for the production of transport metal]. Russia, Nizhnyi Tagil : NMTK Publ., 2008, 394 p., pp. 88–113. (in Russian).
9. Sladkovskiy A., Yessaulov V., Shmurygin N., Taran Yu. and Gubenko S. An Analysis of Stress and Strain in Freight Car Wheels. *Transactions on Modelling and Simulation*. 1997, no. 16, pp. 15–24.
10. Gubenko S., Proidak Yu. Investigation of wear mechanism of tread during operation of railway wheels. *Transport problems*. 2012, no. 7, pp. 119–125.
11. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Mikroneodnorodnaya deformatsiya stali, sodержashchey nemetallicheskiye vklucheniya* [Microinhomogeneous deformation of steel containing nonmetallic inclusions]. *Izvestiya AN SSSR. Metally* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1981, no. 4, pp. 94–97. (in Russian).
12. Gubenko S., Proidak Yu., Kozlovskiy A., Shramko A. and Iskov M. Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels. *Telematics, Logistics and Transport Safety : Materials of VIII Scientific Conference TLTS'08*. Poland, Katowice-Cieszyn, 2008, October 16–18.

13. Beretta S., Carboni M. and LoConte A. Impact of corrosion upon fatigue properties of steel. The 15-th International Wheelset Congress (October 2007). Praga, Chesh. Repub., 2007, pp. 294–300.
14. Gubenko S.I. *Nemetallicheskie vkluchenija i prochnost stali* [Non-metallic inclusions and strength of steel]. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015, 476 p. (in Russian).
15. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskih vklyuchenij* [Physics of steel fracture near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk : NmetAU Publ., Information Technology Systems Technologies. 2014, 301 p. (in Russian).
16. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Deformatsiya nemetallicheskih vklyuchenij pri prokatke stali* [Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling]. *Izvestiya AN SSSR. Metally* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1983, no. 4, pp. 80–84. (in Russian).
17. Gubenko S.I. *Mezhfaznie granitsi vkluchenie-matritsa I svoisrva stalej* [Interphase boundaries inclusion-matrix and properties of steels]. Germany – Mauritius : Palmarium academic publishing, 2017, 506 p. (in Russian).
18. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklyucheniya i plastichnost' staley* [Non-metallic inclusions and ductility of steels. The physical basis of the ductility of steels]. Saarbrücken : LAP LAMBERT, Palmarium academic publishing, 2016, 549 p. (in Russian).
19. Gubenko S.I. *K voprosu o stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskoje vklyuchenije-matritsa v stali* [To the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion-matrix in steel]. *Izvestiya AN SSSR. Metally* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1994, no. 6, pp. 105–112. (in Russian).
20. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyje vklyucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
21. Gubenko S.I. and Bespalko V.N. *Osobennosti korrozii kolesnoy stali* [Peculiarities of wheel steel corrosion]. Actual trends of modern scientific research : The 1st International scientific and practical conference (July 19–21, 2020). MDPC Publishing, Munich, Germany, 2020, 379 p., pp. 154–160. (in Russian).
22. Gubenko Svetlana. *Fizicheskaya priroda plastichnosti i uprochneniya metallov pri deformatsii* [Physical nature of plasticity and strengthening of metals upon deformation]. Germany – Mauritius, Beau Bassin, LAP LAMBERT academic publishing, 2020, 341 p. (in Russian).
23. Gubenko S.I. *Treshchinoobrazovaniye v obod'yakh zhelezodorozhnykh koles v protsesse ekspluatatsii* [Cracking in the rims of railway wheels during operation]. Modern science: problems and innovations : The 5th International scientific and practical conference (July 26–28, 2020). SSPG Publish, Stockholm, Sweden, 2020, pp. 125–131. (in Russian).
24. Nozdrin V.F., Usherenko S.M. and Gubenko S.I. *O mekhanizme uprochneniya metallov pri sverkhglubokom pronikanii vysokoskorostnykh chastits* [On the mechanism of metal hardening during superdeep penetration of high-speed particles]. *Fizika i himiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of material processing]. 1991, no. 6, pp. 19–24. (in Russian).
25. Usherenko S.M., Nozdrin V.F. and Gubenko S.I. *Izmeneniye struktury metallicheskoj misheni pri vysokoskorostnom vnedrenii dispersnykh chastits* [Changes in the structure of a metal target during high-speed penetration of dispersed particles]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 1991, no. 6, pp. 34–36. (in Russian).
26. Gubenko S.I., Pinchuk S.I. and Belaya E.V. The influence of the structural state of wheel steel on the development of corrosion. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. 2009, no. 2, pp. 69–73. (in Russian).
27. Gubenko S.I., Pinchuk S.I. and Belaya E.V. *Sistemnoye issledovaniye mekhanizma iznosa poverkhnosti kataniya zhelezodorozhnogo kolesa* [System study of wear mechanism of railway wheel tread surface]. Metallurgical and Mining Industry. 2010, no. 2 (1), pp. 51–56. (in Russian).
28. Gubenko S.I., Pinchuk S.I. and Belaya E.V. *Vliyaniye strukturnogo sostoyaniya kolesnoy stali na razvitiye korrozii* [Influence of the structural state of wheel steel on the development of corrosion]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. 2009, no. 2, pp. 69–73. (in Russian).
29. Gubenko S.I., Pinchuk S.I. and Belaya E.V. *Issledovaniye vliyaniya nemetallicheskih vklyuchenij na korroziionnoye povedeniye kolesnoy stali* [Investigation of the influence of non-metallic inclusions on the corrosion behavior of wheel steel]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. 2011, no. 7, pp. 70–74. (in Russian).
30. Gubenko S.I., Pinchuk S.I. and Belaya E.V. Investigation of non-metallic inclusion effect on corrosion behavior of wheel steel. Metallurgical and Mining Industry. 2011, no. 3 (2), pp. 63–66.
31. Pinchuk S., Gubenko S. and Belaya E. Correlation between electrochemical corrosion and structural state of steel by simulation of operation conditions of railway wheels. Chemistry & Chemical Technology. 2010, no. 4 (2), pp. 151–158.
32. Gubenko S.I. and Bespalko V.N. *Uroven' plastichnosti mul'tifaznykh vklyuchenij v stalyakh* [The level of plasticity of multiphase inclusions in steels]. Innovative development of science and education : Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference (21–23 June 2020). ISGT Publishing House, Athens, Greece, 2020, pp. 117–123. (in Russian).

Поступила в редакцию: 12.06.20.