

8. Pühl H.-G. Zur statischen berechnung und prüfung nachgiebiger grubenstempel // Glückauf-Forschungshefte, Deutschland. 1973. № 6. P. 237-244.
9. Gerhard Schmausser, Klaus J. Pittner. Zur berechnung schlanrek arbeitszylinder // Ölhydraulik und Pneumatik, Deutschland. 1991. № 10. P. 767-775.
10. Cylinders. Fluid power reference issue // Machine Design, OH, USA. 1979, September. P. 181-186.
11. Cylinders. Fluid power reference issue // Machine Design, OH, USA. 1980, September. P. 184-193.
12. Cylinders. Fluid power reference issue // Machine Design, OH, USA. 1982, September. P. 184-192.
13. Cylinders. Fluid power reference issue // Machine Design, OH, USA. 1983, September. P. 169-175.
14. Cylinders. Fluid power reference issue // Machine Design, OH, USA. 1987, September. P. 113-120.
15. Cylinders. Fluid power reference issue // Machine Design, OH, USA. 1988, September. P. 111-118.
16. Kobzov D.Yu., Tarasov V.A. Trofimov A.A. Hydraulic road and construction machines. Pt. 2. Operating conditions, workflow, mode of operation and loading parameters. Bratsk, 1999. 108 p. Rus. Dep. v VINITI 01.12.99, № 3552-V1999.
17. Kobzov D.Yu., Zhmurov V.V. Hydraulic cylinders of single bucket hydroficated machines. Bratsk, 2010. 105 p. Rus. Dep. v VINITI 17.05.2010, № 288-V2010.
18. Kobzov D.Yu., Sergeev A.P. On the characteristics of the spatial arrangement of hydraulic cylinders of the working equipment of single bucket construction excavators // Povyshenie effektivnosti mashin i vibratsionnye protsessy v stroitel'stve. Yaroslavl', 1989. P. 95-100.
19. Kobzov D.Yu., Svirido I.V., Gubanov V.G. Operating conditions and some important features of the working process of hydraulic cylinders and road construction machinery. M., 1995. 37 p. Dep. MASHMIR 1995. № 15-sd94.

УДК 629.4-592

DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-64-68

Влияние микроструктуры и твердости тормозной локомотивной колодки на трещинообразование чугуна

А.А. Климов^{1 a}, С.В. Домнин^{1 b}, А.В. Стручков^{2 c}, В.П. Кирпиченко^{1 d},
В.П. Ильинский^{1 e}, В.Б. Бондарик^{3 f}

¹Красноярский институт железнодорожного транспорта — филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, ул. Л. Кецховели 89, Красноярск, Россия

²Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М.Ф. Решетнева, пр. «Красноярский рабочий» 31, Красноярск, Россия

³Красноярская железная дорога ОАО «РЖД», ул. Горького 6, Красноярск, Россия

^aanatoly.klimoff2013@yandex.ru, ^bdomninsv-66@yandex.ru, ^cstr-alex-v@mail.ru, ^dkvh_k@mail.ru, ^eilinskiy_vp@krsk.irkgups.ru, ^fbondarikVB@krw.rzd

Статья поступила 15.02.2016, принята 16.03.2016

Авторами исследован вопрос о влиянии наиболее важной механической характеристики, определяющей износ трибологической пары «колесо – колодка», — твердости тормозной колодки. Актуальность данного вопроса обуславливается тем, что твердость колодки определяет величину износа, изменение твердости по сечению вызывает качественные изменения процессов трения, а большой разброс твердости по колодкам приводит к недоиспользованию материала части колодок. В статье приводится обстоятельный микроструктурный анализ чугуна тормозных локомотивных колодок и отмечается, что их твердость главным образом определяется микроструктурой чугуна. Микроструктура и твердость материала тормозных колодок оказывают влияние на процесс появления трещин, приводящий к выкрашиванию материала (чему дополнительно способствует наличие раковин в объеме колодки), уменьшению площади поверхности трения, увеличению опасности повреждения колес осколками чугуна, попадающими на рельсы, и к преждевременному выходу из строя колодок. Для получения закономерности зависимости процесса трещинообразования от твердости и от микроструктуры чугуна были проведены эксплуатационные испытания на электровозе-толкаче трех групп колодок, две из которых были разделены по твердости и имели стандартную микроструктуру, а третья группа — экспериментальную феррито-графитовую микроструктуру. Анализ исследованных отработанных колодок показал, что увеличение содержания связанного углерода не приводит к повышению их прочности, напротив, при этом увеличивается трещинообразование и происходит более интенсивное разрушение материала колодок. Изменение структуры чугуна на более устойчивую, феррито-графитовую, обеспечивает существенное увеличение прочности чугуна, а значит и более эффективное использование материала колодок.

Ключевые слова: локомотивные тормозные колодки; износ; трибологическая пара «колесо – колодка»; твердость; трещинообразование; эксплуатационные испытания.

Influence of microstructure and hardness of locomotive brakeblocks on cast iron crack growth

A.A. Klimov^{1 a}, S.V. Domnin^{1 b}, A.V. Struchkov^{2 c}, V.P. Kirpichenko^{1 d}, V.P. Ilyinskiy^{1 e}, V.B. Bondarik^{3 f}

¹Krasnoyarsk Railway Transport Institute, branch of Irkutsk State Transport University; 89, Lado Ketshoveli St., Krasnoyarsk, Russia

²Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev; 31, Krasnoyarskiy Rabochiy Ave., Krasnoyarsk, Russia

³Krasnoyarsk Railways, JSC Russian Railways; 6, Gorkiy St., Krasnoyarsk, Russia

^aanatoly.klimoff2013@yandex.ru, ^bdomninsv-66@yandex.ru, ^cstr-alex-v@mail.ru, ^dkvh_k@mail.ru, ^eilinskiy_vp@krsk.irkups.ru,

^fbondarikVB@krw.rzd

Received 15.02.2016, accepted 16.03.2016

The influence of the brakeblock hardness has been examined in the article which is the most important mechanical characteristics, determining the wear of tribological pair «wheel – brakeblock». The relevance of this issue is due to the fact that the hardness of a brakeblock determines the amount of wear, changes of hardness across the section leads to qualitative changes in friction processes, and wide range of brakeblock hardness leads to under-utilization of the material of a part of brakeblocks. The article presents an extensive analysis of the microstructure of cast iron locomotive brakeblocks. It has been emphasized that the hardness is mainly determined by the cast iron microstructure. Microstructure and hardness of the brakeblock material influence the cracking process. The process results in the material shell-out (which is additionally stimulated by shells in the brakeblocks), in reducing the area of the friction surface, in increasing the risk for the wheels being damaged by cast iron fragments, and in early brakeblock functional loss. To receive the dependency for the cracking process on the hardness and cast iron microstructure, performance tests for three brakeblock groups have been conducted on an electric locomotive-pusher. Two of the groups have been divided according to their hardness and have had standard microstructure. The third one has had an experimental graphite-ferrite microstructure. The analysis of the waste brakeblocks has demonstrated that the fixed carbon increase does not result in strength increase. On the contrary, it increases the crack growth and brakeblock material is destructed more intensively. Changing the cast iron structure on more sustainable ferrite-graphite structure ensures substantial increase of the cast iron strength and, thus, more efficient use of brakeblock material.

Key words: locomotive brakeblocks; wear; tribological pair «wheel – brakeblock»; hardness; crack growth; performance tests.

Введение

Одними из наиболее важных показателей, определяющих нормальный износ трибологической пары «колесо – колодка», являются твердость тормозной колодки и стабильность этого показателя по ее сечению [1; 2]. Это обуславливается тем, что твердость колодки определяет величину износа, а изменение твердости по сечению колодки приводит к качественному изменению процессов трения. При этом большой разброс твердости по колодкам приводит к недоиспользованию материала части колодок.

Твердость чугуна тормозных колодок главным образом определяется его микроструктурой. Микроструктура и твердость материала тормозных колодок оказывают влияние на процесс появления трещин в процессе эксплуатации, что приводит к разрушению материала, преждевременному выходу из строя колодок и недоиспользованию чугуна, что при огромных масштабах расхода тормозных колодок по железнодорожной сети существенно снижает экономическую эффективность перевозок [3–5].

Кроме того, активное трещинообразование приводит к выкрашиванию материала (этому способствует наличие раковин в объеме колодки), уменьшению площади поверхности трения и увеличивает опасность повреждения колес осколками чугуна, попадающими на рельсы [6–8].

Микроструктурный анализ. В соответствии с ГОСТ 302-49-97 микроструктура тормозных чугунных локомотивных колодок типа М [9] состоит из четырех составляющих:

- перлит;
- графит;

– цементит;

– фосфидные эвтектики.

Базовой фазой в микроструктуре является перлит, который обеспечивает минимальную твердость (НВ229). Верхняя граница стандартной твердости (НВ303) обеспечивается в основном цементитом.

В зависимости от соотношения перлита и цементита в микроструктуре твердость изменяется от НВ229 до НВ303. Соотношение перлита и цементита зависит от содержания углерода в исходном чугуне, который варьируется в пределах 2,7–3,4 %. Фосфор, присутствующий в составе до 0,9 %, образует фосфидные эвтектики, которые увеличивают твердость, но охрупчивают металлическую основу чугуна (рис. 1).

Ускоренное охлаждение тормозной колодки в процессе литья в зонах первичного и вторичного превращений приводит к появлению брака микроструктуры в виде поверхностного отбела или половинчатого чугуна (рис. 2).

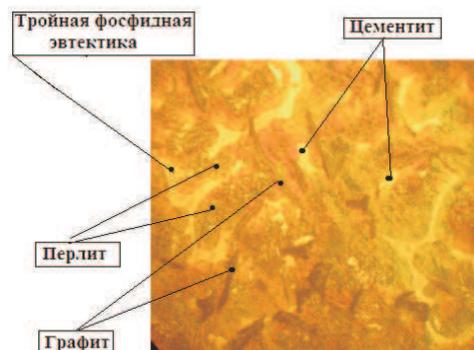


Рис. 1. Структура стандартной тормозной колодки

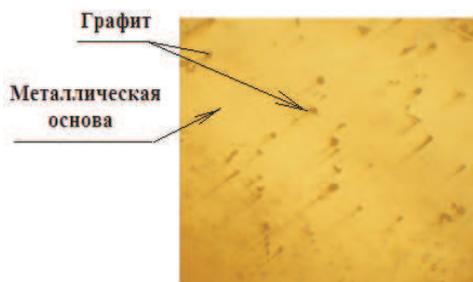


Рис. 2. Микроструктура нетравленного микрошлифа половинчатого чугуна (бракованная по повышенной твердости колодки)

Сравнение распределения графита в микроструктуре колодки с твердостью HB450 (рис. 2) со стандартной микроструктурой (рис. 3), показывает, что количество графита резко снижено. Форма этих включений указывает на начальную стадию кристаллизации графита в виде зародышей, которые не смогли развиться из-за быстрого охлаждения.

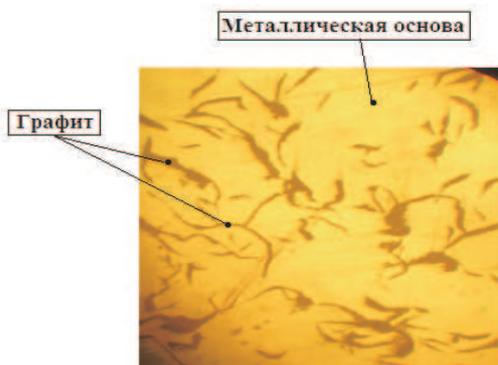


Рис. 3. Распределение графита в металлической основе чугуна

Типичное строение половинчатого чугуна с большим количеством цементита и ледобурита (примерно половина площади) (рис. 4) указывает на то, что почти весь углерод в составе чугуна находится в связанном состоянии. Это подтверждается результатом измерения твердости (HB450).

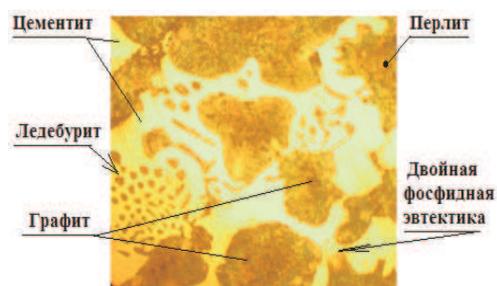


Рис. 4. Микроструктура травленного микрошлифа половинчатого чугуна тормозной колодки

Кроме того, заметно тяготение ледобурита и цементита к образованию отдельных блоков, к которым также присоединяются химические соединения фосфора. Такое блочное строение приводит к появлению на поверхности колодки зон повышенной твердости и образованию натиров.

Анализ результатов сравнительных эксплуатационных испытаний тормозных локомотивных колодок. Для исследования влияния микроструктуры и твердости колодок на процесс трещинообразования были проведены их сравнительные испытания до предельного износа на электровозе-толкаче. Колодки были отобраны и разделены на три группы — экспериментальная (№ 1), пониженной (№ 2) и повышенной стандартной твердости (№ 3) [10–13].

Анализ результатов исследований (рис. 5) показал, что количество натиров и задиров находится в прямой зависимости от твердости для стандартной структуры (№ 2 и 3). Микроструктура, имеющая в составе феррит и графит (№ 1), обладает твердостью в среднем на 10 % больше стандартной микроструктуры № 2 и на 10 % меньше стандартной микроструктуры № 3; имеет на 20 % меньше площади натиров по сравнению со стандартной микроструктурой № 2 и на 37 % меньше по сравнению со стандартной микроструктурой № 3.

Кроме того, задир на поверхности колодки с микроструктурой Ф + Г совершенно отсутствуют. Это объясняется тем, что в экспериментальной микроструктуре колодки отсутствует связанный углерод, что обеспечивает более стабильную структуру, практически не зависящую от содержания углерода.

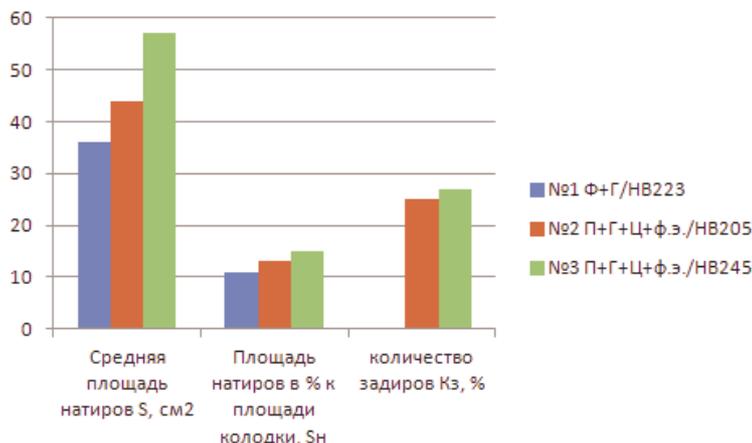


Рис. 5. Гистограммы зависимости количественного образования зон натиров и задиров на поверхности колодки от микроструктуры

Флуктуация состава по углероду сказывается только на количестве графита. Стабильность структуры и большое количество графита обеспечивают более равномерный износ и наличие разделительной пленки в процессе сухого абразивного износа [12–14].

Синий цвет оксидных пленок на поверхности натиров говорит о нагреве до 300 °С. Кроме того, наличие на поверхностях трения колодок материала бандажей (задиры) говорит о том, что в зонах возросшего удельного давления возникает температура выше температуры плавления металла бандажа [3]. Воздействие температуры в зоне трения на материал колодок и бандажей колес локомотивов усугубляется еще и тем, что температура повышается при торможении и снижается при нормальном движении локомотивов [3; 15], т. е. происходит раскачивание микроструктуры в зоне скопления связанного углерода. Химические соединения распадаются с резким уменьшением твердости при повышении температуры и восстанавливаются со снижением температуры, что приводит к постепенному ослаблению связей между структурными блоками за счет появления микротрещин. С течением времени микротрещины сливаются, образуя трещины, чему сопутствуют мелкие и крупные дефекты макроструктуры — поры, включения шлака, раковины и др.

Из сказанного можно сделать вывод о том, что признаком блочности микроструктуры является трещинообразование.

Исследование трещинообразования на поверхности тормозных колодок, отработанных в процессе эксплуатационных испытаний на электровозе-толкаче до предельного износа, показало, что трещинообразование материала колодок напрямую зависит от количества связанного углерода и микроструктуры (рис. 6).

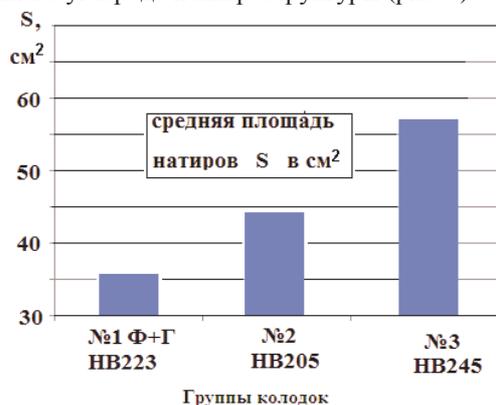


Рис. 6. Средняя длина трещин на поверхности колодок

С повышением твердости колодок со стандартной микроструктурой резко повышается трещинообразование — повышение твердости на 20 % приводит к увеличению трещинообразования на 283 %. Изучение характера трещин доказывает, что микроструктура Ф + Г тормозных колодок имеет высокую степень равномерности.

Если на поверхности колодок № 2 и 3 образуется множество мелких трещин, образующих сеточную структуру, то на поверхности экспериментальных колодок это трещины поперечные, возникшие от нерав-

номерных радиальных усилий, являющихся следствием плохого прилегания спинки колодки.

Выводы

Проведенные сравнительные испытания тормозных колодок до предельного износа на электровозе-толкаче и анализ их результатов показали, что повышение твердости тормозных локомотивных колодок за счет увеличения содержания связанного углерода не приводит к росту их прочности, наоборот, при этом более активно идут процессы трещинообразования и разрушения материала колодок. Вместе с тем, изменение микроструктуры чугуна на более устойчивую феррито-графитовую обеспечивает существенное увеличение прочности чугуна, а значит, более эффективное использование материала колодок.

Литература

1. Новачук Я.А., Никитин Д.Н., Коблов Р.В. Кинематика взаимодействия «колесо-рельс» // Мир транспорта. 2012. № 4.
2. Справочник. В 2-х кн. / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Аликина. М.: Машиностроение, 1978. Кн. 1. 400 с.
3. Сухов А.В., Брюнчуков Г.И., Тимофеев В.В. Локомотивные бандажи марки 4 // Железнодорожный транспорт. 2012. № 2. С. 58-61.
4. Паулин И.А., Холин А.Д., Хабаров И.В., Денисов Р.А., Стручков А.В. Анализ исследований износостойкости рабочих поверхностей рельсов технологических путей авиастроительных предприятий // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. Т.1, № 9. С. 163-164.
5. Паулин И.А., Холин А.Д., Хабаров И.В. Денисов Р.А., Стручков А.В. Разработка устройства для повышения износостойкости рабочих поверхностей рельсов технологических путей авиастроительных предприятий // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. Т.1, № 9. С. 168.
6. Климов А.А., Домнин С.В. Испытания колодок тормозных чугунных (ГОСТ 302-49-97) для локомотивов: отчет о НИР. Рег. № И130625053745. КриЖТ; ИрГУПС. Красноярск, 2013. 57с.
7. Красиков Г.В. Повышение ресурса чугунных тормозных колодок локомотива // Молодой ученый. 2011. № 2. Т. 1. С. 35-38.
8. Бисерикан М.И., Иванова Ю.А., Иванов В.В. Совершенствование обточка колес подвижного состава с усталостными дефектами // Омский научный вестник. 2012. № 2. С. 120-124.
9. Колодки тормозные чугунные для локомотивов. Технические условия: ГОСТ 30249-97. Межгосударственный стандарт. Введ. 1999-07-01. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2005. 11 с.
10. Климов А.А., Домнин С.В., Хацкевич Д.С. Способ повышения износостойкости тормозных локомотивных колодок из серого чугуна // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Современные концепции научных исследований»: Москва, 27-30 дек. 2014 г. Евразийский союз ученых. М., 2014. Ч. 1, № 9. С. 82-86.
11. Климов А.А., Домнин С.В., Стручков А.В., Хацкевич Д.С., Денисов Р.А., Хабаров И.В. Исследование возможности использования феррито-графитовой микроструктуры для чугуна тормозной локомотивной колодки // Материалы IX

Международной научно-практической конференции «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия». Новосибирск, 13-14 марта 2015 г. Новосибирск, 2015. Ч. 2, № 2 (9). С. 161-165.

12. Климов А.А., Стручков А.В., Денисов Р.А. Фрикционный чугун для тормозных локомотивных колодок и способ его получения: пат. 2573848 Рос. Федерация № 2014119182/02; заяв. 24.07.14; опубл.; 27.01.16, Бюл. № 3.

13. Климов А.А., Стручков А.В., Денисов Р.А., Хацкевич Д.С. Способ повышения износостойкости тормозных локомотивных колодок: пат. 2575505 Рос. Федерация. № 2014119180/02; заяв. 13.05.14; опубл., 20.02.16, Бюл. № 5

14. Стручков А.В., Климов А.А. Разработка способа и устройства для повышения износостойкости рабочей поверхности головки рельса // Материалы XIX международной научной конференции «Решетневские чтения», 10-14 нояб. 2015 г. Красноярск. Красноярск: СибГАУ, 2015. Ч. 1. С. 348–351.

15. Климов А.А., Стручков А.В., Денисов Р.А. Способ термообработки рабочей поверхности головки рельса: пат. № 2556257 Рос. Федерация. № 2013136625/02; завл.05.08.13; опубл. 10.07.15, Бюл. №19.

References

1. Novachuk Ya.A., Nikitin D.N., Koblov R.V. Kinematics of wheel-rail interaction // World of Transport. 2012. № 4.

2. Reference. in 2 vol. / Under the editorship of I. V. Kravtsovskii who and V. V. Alisina. M.: Mashinostroyeniye, 1978. kn. 1. 400 p.

3. Sukhov A.V., Bryunchukov G.I., Timofeev V.V. Gripper tyres brand 4 // Zheleznodorozhnyi transport. 2012. № 2. P. 58-61.

4. Paulin I.A., Kholin A.D., Khabarov I.V., Denisov R.A., Struchkov A.V. Studies durability of working surfaces of rails technology ways of aviation enterprises // Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki. 2013. T.1, № 9. P. 163-164.

5. Paulin I.A., Kholin A.D., Khabarov I.V. Denisov R.A., Struchkov A.V. Develop device to enhance the durability of working surfaces of rails technology ways of aviation enterprises // Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki. 2013. T. 1, № 9. 168. p.

6. Klimov A.A., Domnin S.V. Testing brake pads cast iron (GOST 302-49-97) for locomotives: a research report. Reg. No.II30625053745. KrIZhT; IrGUPS. Krasnoyarsk, 2013. 57 p.

7. Krasikov V. G. Increasing resource brake pads cast iron locomotive // Young scientist. 2011. № 2. Vol. 1. P. 35-38.

8. Biserikan M.I., Ivanova Yu.A., Ivanov V.V. Improvement turning rolling with fatigue defects // Omsk scientific bulletin. 2012. № 2. P. 120-124.

9. Brake pads made of cast iron for locomotives. Tekhnicheskie usloviya: GOST 30249-97. Mezghosudarstvennyi standart. Vved. 1999-07-01. Minsk: Mezghos. sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii. M.: FGUP «Standartinform», 2005. 11 p.

10. Klimov A.A., Domnin S.V., Khatskevich D.S. Way durability improvement of brake locomotive pads from grey pigiron // Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye kontseptsii nauchnykh issledovaniy»: Moskva, 27-30 dek. 2014 g. Evraziiskii soyuz uchenykh. M., 2014. Ch.1, № 9. P. 82-86.

11. Klimov A.A., Domnin S.V., Struchkov A.V., Khatskevich D.S., Denisov R.A., Khabarov I.V. Study the possibility of using ferrite-graphite microstructure for cast iron locomotive brake pads // Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnye perspektivy XXI veka. Dostizheniya i perspektivy novogo stoletiya». Novosibirsk, 13-14 marta 2015 g. Novosibirsk, 2015. Ch. 2, № 2 (9). P. 161-165.

12. Klimov A.A., Struchkov A.V., Denisov R.A. Friction cast iron brake pad for locomotive and its production method: Pat. 2573848 ROS. Federation No. 2014119182/02, stated. 24.07.2014; publ., 27.01.2016. Bull. No. 3.

13. Klimov A.A., Struchkov A.V., Denisov R.A., Khatskevich D.S. A method of increasing the wear resistance of the locomotive brake pads: Pat. 2575505 ROS. Federation. № 2014119180/02, stated. 13.05.2014; publ. 20.02.2016. Bull. No. 5.

14. Struchkov A.V., Klimov A.A. Method and device for improving the wear resistance of the working surface of the rail head // Materialy XIX mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Reshetnevskie chteniya», 10-14 noyab. 2015 g. Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: SibGAU, 2015. Ch. 1. P. 348-351.

15. Klimov A.A., Struchkov A.V., Denisov R.A. Method of heat treatment of the working surface of rail head: Pat. No. 2556257 ROS. Federation. No. 2013136625/02; literary Manager.05.08.13.; publ. 10.07.15. Bull. No. 19.