

DOI: 10.15593/24111678/2017.03.06

УДК 629.4-592

**А.А. Климов¹, А.В. Стручков², В.Б. Бондарик¹,
В.П. Ильинский¹, С.В. Домнин¹, В.П. Кирпиченко¹**

¹Красноярский институт железнодорожного транспорта
(филиал Иркутского государственного университета путей сообщения),
Красноярск, Россия

²Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ЧУГУНЕ ТОРМОЗНЫХ ЛОКОМОТИВНЫХ КОЛОДОК

Изложено видение сущности процесса трещинообразования в материале тормозных локомотивных колодок. Трещинообразование приводит к разрушению чугуна колодок на отдельные элементы, которые могут выкалываться в процессе трения и приводить к травмированию колес, попадая на поверхность головки рельса. Микроструктура чугуна тормозных локомотивных колодок, определенная стандартом, не является оптимальной из-за слишком большого различия в твердости и теплопроводности ее составляющих. Твердость колодки зависит от соотношения в микроструктуре графита и цементита. Увеличение содержания цементита автоматически приводит к снижению количества графитной фазы, которая формирует в процессе трения тонкую разделительную пленку между трущимися поверхностями. Кроме того, в процессе износа более пластичной перлитной составляющей твердые цементитные блоки выступают, перераспределяя нагрузки в зоне трения. На выступах реализуются большие удельные давления, что приводит к повышению температуры на них. В конечном итоге термоциклическая нагрузка способствует растрескиванию материала и выкрашиванию его наиболее твердой части. В данной работе установлено, что растрескивание происходит на границах твердой (цементитной) и мягкой (перлитной) фаз по пластинам графита, которые из-за отсутствия прочности и формы (пластинчатой) являются концентраторами напряжения. По мере развития термоциклической нагруженности в процессе трения пластины графита сливаются, образуя микротрещины, которые по мере износа превращаются в трещины. Такое понимание процесса трещинообразования объясняет сетчатость структуры трещинообразования на поверхности изношенных колодок и подтверждает экспериментально установленные выводы, что увеличение твердости колодок (увеличение количества твердых цементитных включений) приводит к увеличению в разы трещинообразования.

Ключевые слова: локомотивные тормозные колодки, состав, микроструктура чугуна, твердость, износ, графит, феррит, цементит, микротрещины, трещинообразование.

**A.A. Klimov¹, A.V. Struchkov², V.B. Bondarik¹,
V.P. Il'inskiĭ¹, S.V. Domnin¹, V.P. Kirpichenko¹**

¹Krasnoyarsk Institute of Railway Transport (Branch of Irkutsk State University of Railway Transport), Krasnoyarsk, Russian Federation

²Siberian State University of Science and Technology
named after Academician M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russian Federation

METALLURGICAL STUDY OF FRACTURE PROCESS IN CAST IRON BRAKE LOCOMOTIVE PADS

In the work of the vision of the entity process the material fracture brake locomotive pads. Crack growth leads to the destruction of cast iron blocks into separate elements that can sliver in the process of friction and cause injury to the wheel, hitting the surface of the rail head. Microstructure of cast iron locomotive brake pads, a certain standard is not optimal due to the too big differences in hardness and thermal conductivity of its constituents and leads to termocyclic cracks. Hardness pad depends on the ratio of the microstructure of graphite and cementite. Increased content of cementite automatically leads to a decrease in the number of graphite phase that forms in the process of rubbing the thin separation film between friction surfaces. Furthermore in the process of wear more plastic solid blocks cementitnye component pearlitic, redistributing the loads in the friction zone. The ledges are implemented large unit of pressure, resulting in higher temperatures on them. Eventually termociklicheskaja the load leads to cracking of the material and vykrashivaniyu his most solid parts. In the work found that cracking occurs at the boundaries of the firm (cementity) and soft (pearlitiy) phases on graphite plates, which due to lack of strength and form (plate) are voltage concentrators. With the development of termocyclic loading in the process of friction of graphite plates fused together, forming cracks that wear as turn into crack. Such an understanding of the process of crack growth alignment of fracture structure explains on the surface worn pads and confirms the findings of the work, where it has been established experimentally that increasing hardness brake pads (increase in the number of particulate inclusions cementity) leads to increase in times of cracking.

Keywords: locomotive brake pads, composition, microstructure, hardness, wear of cast iron, graphite, ferrite, and cementite, cracks, crack growth.

Тормозные локомотивные колодки в соответствии с ГОСТ 30249–97 «Колодки тормозные чугунные для локомотивов. Технические условия»² имеют сложное строение: перлит + графит + цементит + тройная фосфидная эвтектика. При этом твердость цементитной составляющей в два раза превышает твердость перлита, а осредненная твердость колодки зависит от соотношения в микроструктуре графита и цементита, т.е. увеличение содержания цементита автоматически приводит к снижению количества графитной фазы, которая формирует в процессе трения тонкую разделительную пленку между трущимися поверхностями. Кроме того, в процессе износа более пластичной перлитной составляющей твердые цементитные блоки выступают, перераспределяя

² ГОСТ 30249–97. Колодки тормозные чугунные для локомотивов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2005. – 11 с.

нагрузки в зоне трения. На выступах реализуются большие удельные давления, что приводит к повышению температуры на них. Этот процесс усугубляется малой теплопроводностью цементита. В конечном итоге термоциклическая нагрузка приводит к растрескиванию материала и выкрашиванию его наиболее твердой части (рис. 1).



Рис. 1. Элементы тормозных колодок, выкрошившихся в результате трещинообразования

Это явление подтверждается в работе [1], где приводятся данные об интенсивности трещинообразования материала тормозных колодок. В частности, в данной работе на основании эксплуатационных испытаний было установлено, что суммарная длина трещин в группе изношенных колодок, имеющих твердость по верхнему пределу стандарта, на 176 % больше, чем в группе колодок, имеющих твердость по нижнему пределу стандарта. Приведенные данные показывают, что увеличение твердости чугуна тормозных колодок, связанное с увеличением содержания цементитной составляющей, даже в пределах стандарта приводит к увеличению трещинообразования в разы. Что касается влияния такого строения материала тормозных колодок на износ контртела – бандажа колеса локомотива, то, как указывается в работе [2], он более чем в два раза выше для твердых колодок.

Приведенные данные говорят о том, что микроструктура чугуна стандартных тормозных колодок не является оптимальной, а научные [3–7] и патентные изыскания по тормозным колодкам показывают [8–17], что исследования направлены в основном на увеличение износостойкости колодок в отрыве от исследований износа контртела.

Для исследования процесса трещинообразования нами были получены микрошлифы после химического травления поверхностей 5%-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте с изношенных колодок с наличием трещин, которые показывают процесс появления микротрещин, образующих по мере развития сетчатую структуру на поверхности. Появление микротрещин приводит к постепенному их развитию в трещины (рис. 2). Исследование металлической основы микроструктуры чугунов производилось для микрошлифов.

Как видно на фотографии микрошлифа (см. рис. 2), графитные включения (в перлите) образуют отдельный блок, который граничит с крупным блоком твердой фазы с очень мелкими включениями крупнообразного графита. На границе цементитной и перлитной фаз пластины графита начинают сливаться, образуя микротрещину, а на рис. 3 уже видны сформировавшиеся микротрещины в начальной фазе образования.

Исследования травленных микрошлифов, где хорошо видна металлическая основа материала, подтверждают, что микротрещины образуются на границах цементитной фазы и проходят по пластинам графита (рис. 4).

Приведенные фотографии микрошлифов показывают различные степени развития трещин и подтверждают, что микротрещины формируются на границах твердой (цементитной) и мягкой (перлитной) фаз. Определенно можно утверждать, что увеличение количества твердых включений ведет к увеличению трещинообразования. Это подтверждается также работой [1].

Таким образом, микроструктура чугуна тормозных локомотивных колодок, определенная стандартом (ГОСТ 30249–97), не является оптимальной, поскольку слишком велики различия твердости и теплопроводности образующих ее фаз, что приводит за счет термоцикличности процесса трения к появлению сетки микротрещин и в конечном итоге к растрескиванию. При этом интенсивность растрескивания зависит от количества твердых включений. Кроме того, проведенные исследования показали, что трещинообразование материала колодок напрямую зависит от количества связанного углерода и микроструктуры. Увеличение твердости тормозных локомотивных колодок за счет увеличения связанного углерода не приводит к увеличению их прочности, наоборот, при этом увеличивается трещинообразование и возрастает разрушение материала колодок.

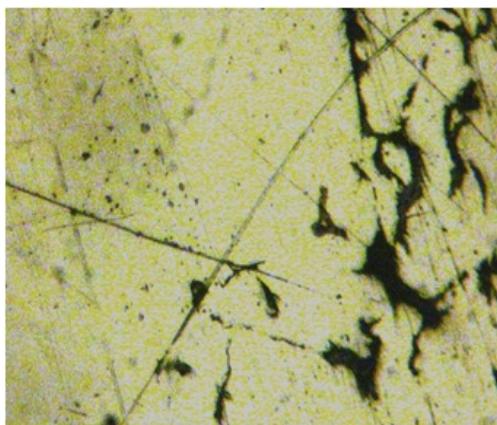


Рис. 2. Начало слияния графитовых пластинок микротрещиной на границе с твердой фазой (образец не травлен, $\times 100$)

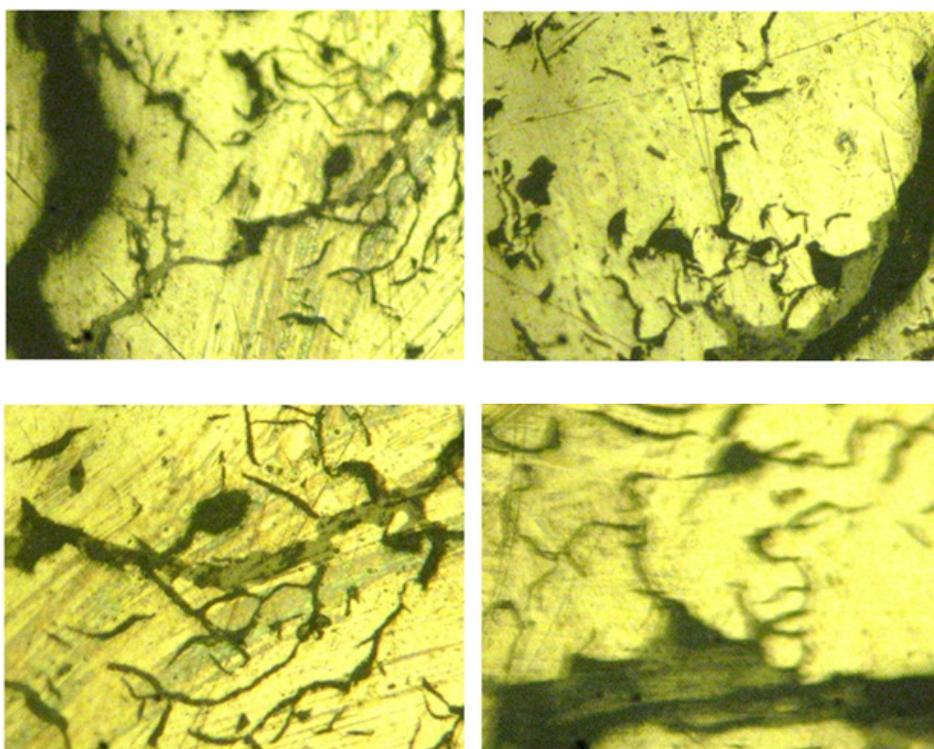
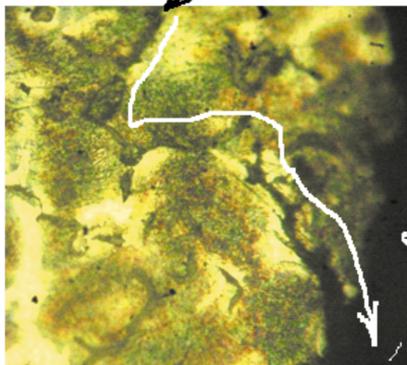


Рис. 3. Сформировавшаяся (видимая без оптики) трещина и образующиеся ответвления в виде микротрещин, проходящих по графитовым пластинам на границах с твердыми включениями (образцы не травлены, $\times 100$)

Микротрещина формируется по пластинам графита и сливается с трещиной



Сформировавшаяся трещина шириной 0,5–0,7мм. Проходит через весь микрошлиф

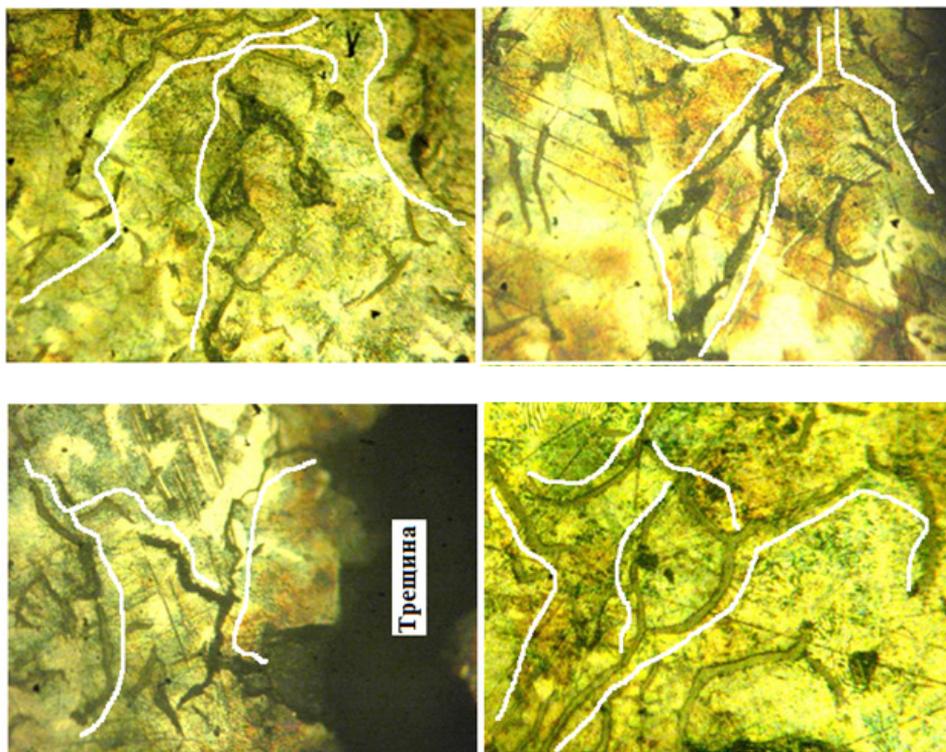


Рис. 4. Формирующаяся сеть микротрещин на поверхности микрошлифа

Изменение микроструктуры чугуна на более устойчивую, феррито-графитовую обеспечивает существенное увеличение прочности чугуна, а значит, более эффективное использование материала колодок. Научные исследования в этом направлении являются актуальными и перспективными [18–21].

Список литературы

1. Влияние микроструктуры и твердости тормозной локомотивной колодки на трещинообразование чугуна / А.А. Климов, С.В. Домнин, А.В. Стручков, В.П. Кирпиченко, В.П. Ильинский, В.Б. Бондарик // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 2. – С. 64–68.

2. Некоторые результаты массового обследования тормозных локомотивных колодок / А.А. Климов, С.В. Домнин, А.В. Стручков, Д.С. Хацкевич, Р.А. Денисов, И.В. Хабаров // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 1 (25). – С. 73–77.

3. Исследования структуры, свойств чугуна и эксплуатационной стойкости тормозных колодок производства ОАО «Сантехлит» / И.К. Кульбовский, Д.Г. Афонин, И.И. Добровольский, Ю.В. Игнатенко // Материаловедческие проблемы в машиностроении: тез. докл. обл. науч.-техн. конф. – Брянск, 1997. – С. 7–8.

4. Афонин Д.Г. Исследование и разработка технологии изготовления отливки тормозной локомотивной колодки для железнодорожного транспорта из износостойкого графитизированного чугуна с повышенной эксплуатационной стойкостью: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2001. – 19 с.

5. Крагельский И.В. Трение и износ. – М: Машиностроение, 1968. – 480 с.

6. Кашеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел. – М.: Наука, 1970. – 247 с.

7. Справочник по триботехнике: в 3 т. / под общ. ред. М. Хебы, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.

8. Фрикционный чугун для тормозных колодок: а.с. № 1567652 СССР, МКИ А1 С22С37/10 / Ларин Т.В. [и др.]. – Заявл. 06.04.87; опубл. 30.05.90. Бюл. № 20.

9. Чугун: а.с. № 834206 СССР, МКИ А1 С22С37/10 / Головатый А.Т. [и др.]. – Заявл. 21.12.79; опубл. 30.05.81. Бюл. № 20.

10. Чугун: а.с. № 487157 СССР, МКИ А1 С22С37/10 / Бухвалова Н.А. [и др.]. – Заявл. 13.02.74; опубл. 05.10.75. Бюл. № 37.

11. Антифрикционный чугу́н: пат. № 2101379 Рос. Федерация, МПК С22С37/10 / Сильман Г.И. [и др.]. – Заявл. 29.07.96; опубл. 10.01.98. Бюл. № 1.

12. Серый антифрикционный чугу́н: пат. № 2409689 Рос. Федерация, МПК С22С37/10 / Алов В.А. [и др.]. – Заявл. 11.06.2009; опубл. 20.01.2011. Бюл. № 2.

13. Антифрикционный чугу́н: пат. № 2212467 Рос. Федерация, МПК С22С37/10 / Сильман Г.И. [и др.]. – Заявл. 01.08.2001. опубл. 20.09.2003. Бюл. № 26.

14. Способ получения отливок для тормозных колодок из серого чугуна: пат. № 2019572 Рос. Федерация, МПК С22С37/10, С21В11/10 / Кульбовский И.К. [и др.]. – Заявл. 28.12.1992; опубл. 15.09.1994. Бюл. № 17.

15. Высокофосфористый антифрикционный чугу́н: пат. Японии № 55-5575, МПК С22С 37/06, 1980.

16. Серый антифрикционный чугу́н: пат. Японии № 57-32352, МПК С22С 37/08, 1982.

17. Компоненты чугуна для изготовления тормозных колодок: пат. США № 3767386, МПК С22С 37/06, U.S.Cl. 75/123D, 75/123R Еши-така Уеда [и др.]. – Заявл. 05.04.1971; опубл. 23.10.1973. 16. 69 (02).

18. Способ улучшения трибологических характеристик пары «колесо – тормозная колодка» локомотивов / А.А. Климов, С.В. Домнин, А.В. Стручков, В.П. Кирпиченко [и др.] // Технические науки – от теории к практике: сб. публикаций науч. журнала «Глобус» по материалам VIII Междунар. конф., Санкт-Петербург, 20 апреля 2016 г. – СПб., 2016. – С. 47–53.

19. Фрикционный чугу́н для тормозных локомотивных колодок и способ его получения: пат. № 2573848 Рос. Федерация, МПК С22С37/10, С21D 5/02 / Климов А.А., Стручков А.В. [и др.]. – Заявл. 24.07.2014; опубл. 27.01.2016. Бюл. № 3.

20. Способ повышения износостойкости тормозных локомотивных колодок: пат. № 2575505 Рос. Федерация, МПК С21D 5/02 / Климов А.А., Стручков А.В. [и др.]. – Заявл. 13.05.2014; опубл. 20.02.2016. Бюл. № 5.

21. Исследование возможности использования феррито-графитовой микроструктуры для чугуна тормозной локомотивной колодки / А.А. Климов, С.В. Домнин, А.В. Стручков, В.П. Кирпиченко [и др.] // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф.: ежемесяч. науч. журнал. Ч. 2. Техн. науки. – 2015. – № 2 (9). – С. 161–165.

References

1. Klimov A.A., Domnin S.V., Struchkov A.V., Kirpichenko V.P., Ilyinsky V.P., Bondarik V.B. Vliianie mikrostruktury i tverdsti tormoznoi lokomotivnoi kolodki na treshchinoobrazovanie chuguna [The Influence of microstructure and hardness of the locomotive brake pads for cracking of cast iron]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii: Nauchnyi periodicheskii zhurnal*, 2016, no. 2, pp. 64-68
2. Klimov A.A., Domnin S.V., Struchkov A.V., Khatskevich D.S., Denisov R.A., Khabarov I.V. Nekotorye rezul'taty massovogo obsledovaniia tormoznykh lokomotivnykh kolodok [Some of the results of screening brake locomotive pads]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2015, no. 1 (25), pp. 73-77.
3. Kulbovskij I.K., Afonin D.G., Dobrovolsky I.I., Ignatenko U.V. Issledovaniia struktury, svoistv chuguna i ekspluatatsionnoi stoikosti tormoznykh kolodok proizvodstva OAO "Santekhlit" [Study of the structure, properties and durability of cast iron brake blocks produced by OJSC "Santekhlit"] *Materialovedcheskie problemy v mashinostroenii*. Briansk, 1997.
4. Afonin D.G. Issledovaniye i razrabotka tekhnologii izgotovleniya otlivki tormoznoy lokomotivnoy kolodki dlya zhelezodorozhnogo transporta iz iznosostoykogo grafitizirovannogo chuguna s povyshennoy ekspluatatsionnoy stoykostyu [Research and development of technologies for the manufacturing of castings, brake pads for railway locomotive from wear-resistant cast iron rich graphite with increased operational resistance]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2001, 19 p.
5. Kragelskiy I.V. Treniye i iznos [Friction and wear]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1968, 480 p.
6. Kashcheyev V.N. Abrazivnoye razrusheniye tverdykh tel [Abrasive solids destruction]. Moscow, Nauka, 1970, 247 p.
7. Spravochnik po tribotekhnike [Directory of triboengineering]. Ed. M. Kheba, A.V. Chichinadze. Moscow, Mashinostroyeniye, 1989, 400 p.
8. Larin T.V. Frikcionnyj chugun dlya tormoznykh kolodok [Friction cast iron for brake pads]: A.S. no. 1567652 USSR, 1987.
9. Holovaty A.T. Chugun [Cast]. A.S. no. 834206 USSR, 1979.
10. Bukhvalova N.A. Chugun [Cast]: A.S. no. 487157 USSR, 1975.
11. Silman G.I. Antifrikcionnyj chugun [Antifriction cast iron]: A.S. no. 2101379 USSR, 1996.
12. Alov V.A. Seryj antifrikcionnyj chugun [Grey antifriction cast iron]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2409689, 2009.

13. Silman G.I. Antifrikcionnyj chugun [Antifriction cast iron]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2212467, 2001.

14. Kulbowski I.K. Sposob polucheniya otlivok dlya tormoznyh kolodok iz serogo chuguna [The method of producing castings for brake shoes made of cast iron]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2019572, 1992.

15. Vysokofosforisty antifraksiionny chugun [antifriction cast iron with high content of phosphorus]. Japan Patent no. 55-5575, 1980.

16. Sery antifraksiionny chugun [Grey antifriction cast iron]. Japan Patent no. 57-32352, 1982.

17. Yoshitaka Ueda et al. Komponenty chuguna dlya izgotovleniya tormoznykh kolodok [Compound cast -iron for making brake shoes]. Patent US no. 3767386, 1973.

18. Klimov A.A., Dominus S.V., Struchkov A.V., Kirpichenka V.P. Sposob uluchsheniia tribologicheskikh kharakteristik pary “koleso – tormoznaia kolodka” lokomotivov [The way to improve the tribological characteristics of couples “wheel-brake pad” locomotives]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike. VIII mezhdunarodnaja konferencija*. Saint Petersburg, 2016.

19. Klimov A.A., Struchkov A.V. Frikcionnyj chugun dlya tormoznyh lokomotivnyh kolodok i sposob ego polucheniya [The friction brake pads cast locomotive and his way of getting]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2573848, 2014.

20. Klimov A.A., Struchkov A.V. Sposob povysheniya iznosostojkosti tormoznyh lokomotivnyh kolodok [Way to durability improvement of brake locomotive pads]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2575505, 2014.

21. Klimov A.A., Dominus S.V., Struchkov A.V., Kirpichenka V.P. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniia ferrito-grafitovoi mikrostruktury dlia chuguna tormoznoi lokomotivnoi kolodki [Study of the possibility of using ferrite-graphite microstructure for cast iron locomotive brake pads]. *IX mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferentsija Nauchnye perspektivy XXI veka. Dostizheniia i perspektivy novogo stoletia*. Novosibirsk, 2015.

Получено 28.08.2017

Об авторах

Климов Анатолий Александрович (Красноярск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация железных дорог», Красноярский институт железнодорожного транспорта (фи-

лиал Иркутского государственного университета путей сообщения) (660028, г. Красноярск, ул. Ладо Кецховели, 89, e-mail: anatoly.klimoff2013@yandex.ru).

Стручков Алексей Валентинович (Красноярск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (660014, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31, e-mail: str-alex-v@mail.ru).

Бондарик Владимир Борисович (Красноярск, Россия) – аспирант, Красноярский институт железнодорожного транспорта (филиал Иркутского государственного университета путей сообщения), начальник службы технической политики Красноярской железной дороги (660028, г. Красноярск, ул. Ладо Кецховели, 89, e-mail: bondarikVB@krw.rzd).

Ильинский Валерий Павлович (Красноярск, Россия) – заведующий аспирантурой, Красноярский институт железнодорожного транспорта (филиал Иркутского государственного университета путей сообщения) (660028, г. Красноярск, ул. Ладо Кецховели, 89, e-mail: ilinskiy_vp@krsk.irkups.ru).

Домнин Сергей Владимирович (Красноярск, Россия) – аспирант, Красноярский институт железнодорожного транспорта (филиал Иркутского государственного университета путей сообщения), преподаватель Красноярского техникума железнодорожного транспорта (660028, г. Красноярск, ул. Ладо Кецховели, 89, e-mail: domninsv-66@yandex.ru).

Кирпиченко Владимир Петрович (Красноярск, Россия) – аспирант, Красноярский институт железнодорожного транспорта (филиал Иркутского государственного университета путей сообщения), преподаватель Красноярского техникума железнодорожного транспорта (660028, г. Красноярск, ул. Ладо Кецховели, 89, e-mail: kirpichenko_vp@krsk.irkups.ru).

About the authors

Anatolii A. Klimov (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Operation of Railways, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport (Branch of Irkutsk State Transport University) (89, Lado Ketskhoveli st., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation, e-mail: anatoly.klimoff2013@yandex.ru).

Aleksei V. Struchkov (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Machine Design Basics, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev (31, Krasnoyarsky Rabochy av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation, e-mail: str-alex-v@mail.ru).

Vladimir B. Bondarik (Krasnoyarsk, Russian Federation) – the Chief of the Technical Policy of the Krasnoyarsk Railway, Postgraduate Student, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport (Branch of the Irkutsk State University of Means of Communication) (89, Lado Ketskhoveri st., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation, e-mail: bondarikVB@krw.rzd).

Valerii P. Il'inskii (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Head of Postgraduate Studies, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport (Branch of Irkutsk State Transport University) (89, Lado Ketskhoveri st., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation, e-mail: ilinskiy_vp @krsk.irgups.ru).

Sergei V. Domnin (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Teacher College Main Railway Transport of Krasnoyarsk, Postgraduate Student, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport (Branch of the Irkutsk State University of Means of Communication) (89, Lado Ketskhoveri st., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation, e-mail: domninsv-66 @yandex.ru).

Vladimir P. Kirpichenko (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Teacher College Main Railway Transport of Krasnoyarsk, Postgraduate Student, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport (Branch of the Irkutsk State University of Means of Communication) (89, Lado Ketskhoveri st., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation, e-mail: kirpichenko_vp@krsk.irgups.ru).