

Методика построения профилограмм тормозных колодок пассажирского подвижного состава с различными видами дефектов и степенью износа

В.Р. Коновалов¹✉, Е.Ю. Дульский¹, Д.О. Емельянов¹, А.П. Буйносов²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

²Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉konovalovvlad190@gmail.com

Резюме

В статье рассматривается методика построения профилограмм тормозных колодок пассажирского подвижного состава с различными видами дефектов и степенью износа, которая в будущем может сыграть важную роль в снижении износа тормозной колодки пассажирского подвижного состава, что будет способствовать повышению безопасности транспортных средств и принесет определенный экономический эффект. С помощью 3D-сканера RangeVision Spectrum отсканированы тормозные колодки пассажирского подвижного состава с различными видами дефектов и степенью износа. На заключительном этапе в системе автоматизированного проектирования «Компас-3D» были построены профилограммы в виде двухмерных изображений, что позволило определить точную форму и размеры колодки в данном сечении. Анализ профилограмм показал, что различные типы дефектов влияют на износ по-разному. Это требует разработки специальных методов мониторинга износа и оптимизации параметров работы тормозной системы. Однако для получения наиболее точных результатов в исследовании необходимо применять комплексный подход, включающий как теоретический анализ существующих моделей тормозных колодок, так и разработку новых, более точных методов оценки их состояния, что может привести к созданию интеллектуальных систем мониторинга износа тормозных колодок в реальном времени и оптимизации параметров работы тормозной системы в целом. Внедрение современных методов оценки состояния тормозных колодок поможет уменьшить затраты на их закупку и утилизацию, а также приведет к сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу. Результаты исследования будут полезны при разработке новых стандартов и регламентов по эксплуатации и обслуживанию тормозных систем подвижного состава.

Ключевые слова

подвижной состав, тормозная система вагона, тормозная колодка, профилограмма, дефекты тормозных колодок, степень износа

Для цитирования

Методика построения профилограмм тормозных колодок пассажирского подвижного состава с различными видами дефектов и степенью износа / В.Р. Коновалов, Е.Ю. Дульский, Д.О. Емельянов, А.П. Буйносов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4 (84). С. 10–20. DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).10-20.

Информация о статье

поступила в редакцию: 03.10.2024 г.; поступила после рецензирования: 02.11.2024 г.; принята к публикации: 11.11.2024 г.

Methodology for constructing profilograms of brake pads of passenger rolling stock with various types of defects and degree of wear

V.R. Konovalov¹✉, E.Yu. Dul'skii¹, D.O. Emel'yanov¹, A.P. Buinosov²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Ural State Transport University, Yekaterinburg, the Russian Federation

✉konovalovvlad190@gmail.com

Abstract

The article discusses the methodology for constructing profilograms of brake pads of passenger rolling stock with various types of defects and degrees of wear, which in the future may play an important role in reducing the wear of the brake pad of passenger rolling stock. This can improve the safety and efficiency of vehicles. Brake pads of passenger rolling stock with various types of defects and degrees of wear were scanned using a RangeVision Spectrum 3D scanner. The construction of profilograms at the final stage was carried out in the Kompas-3D automated design system, with the help of which profilograms were constructed in the form of two-dimensional images, which made it possible to determine the exact shape and dimensions of the pad in a given section. Analysis of the profilograms showed that different types of defects affect wear differently, which requires the development of special methods for wear monitoring and optimization of the brake system operating parameters. To achieve maximum efficiency, the study requires an integrated approach, including both a theoretical analysis of existing models and the develop-

ment of new, more accurate methods for assessing the condition of brake pads. The new research may lead to the creation of intelligent systems for monitoring brake pad wear in real time and optimizing brake system performance parameters. The introduction of new methods for assessing the condition of brake pads may result in a reduction in the costs of purchasing and disposing of pads, as well as a reduction in emissions of harmful substances into the atmosphere. The results of the research may be used to develop new standards and regulations for the operation and maintenance of rolling stock brake systems, which will improve the safety and efficiency of rail transportation.

Keywords

rolling stock, wagon brake system, brake pad, profilogram, defects of brake pads, degree of wear

For citation

Konovalov V.R., Dul'skii E.Yu., Emel'yanov D.O., Buinosov A.P. Metodika postroeniya profilogramm tormoznykh kolodok passazhirskogo podvizhnogo sostava s razlichnymi vidami defektov i stepen'yu iznosa [Methodology for constructing profilograms of brake pads of passenger rolling stock with various types of defects and degrees of wear]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, No. 4(84), pp. 10–20. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.4(84).10-20.

Article info

Received: October 3, 2024; Revised: November 2, 2024; Accepted: November 11, 2024.

Введение

Повышение эффективности торможения железнодорожного транспорта напрямую связано с безопасностью перевозок и экономической выгодой. Одной из ключевых составляющих тормозной системы является взаимодействие «колодка – колесо», которое влияет на качество торможения и эффективность функционирования поезда в целом.

Несмотря на существующие исследования, комплексное изучение взаимодействия «колодка – колесо» до сих пор не позволяет точно оценить многофакторность процесса трения и его влияние на эффективность торможения, а также выявить закономерности, позволяющие спрогнозировать степень и характер износа тормозных колодок.

Одним из основных способов оценки состояния поверхности тормозной колодки является анализ ее профилограммы.

Профилограмма – это графическое представление износа тормозных колодок, получаемое путем измерения их геометрических параметров в различных точках.

Исследования трибологических процессов в системе «колодка – колесо» представлены в работах [1–3], где были получены первые профилограммы тормозных колодок. Для этого использовался метод натурального графического переноса: на изношенную тормозную колодку накладывался лист бумаги, который плотно прижимался к ее рабочей поверхности, а затем с помощью графитных стержней по деформациям бумаги воспроизводился изношенный профиль колодки (рис. 1).

Целью исследования является разработка новой методики построения профилограмм тормозной колодки с использованием реверсивного инжиниринга.

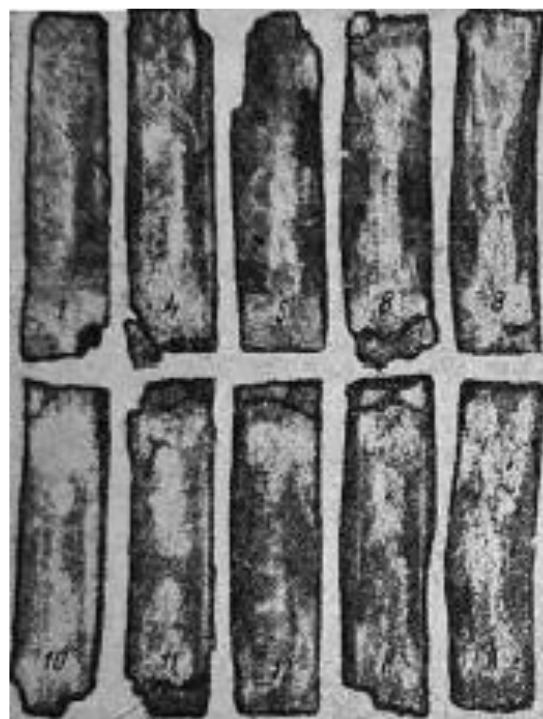


Рис. 1. Первые профилограммы тормозных колодок после опытов

Fig. 1. First profilograms of brake pads after experiments

Процесс построения профилограмм

Построение профилограмм начинается с выбора тормозной колодки подвижного состава и подготовки ее поверхности к сканированию.

В рамках исследования были выбраны тормозные колодки пассажирских вагонов с различной степенью износа. Подготовка тормозных колодок для сканирования включает очистку от грязи и ржавчины для обеспечения точности последующих измерений (рис. 2).

Следующим этапом является сканирование подготовленной тормозной колодки для получения точной 3D-модели. В исследовании сканирование осуществлялось на 3D-сканере RangeVision Spectrum (рис. 3), особенностью

которого является высокая точность сканирования (0,25 мм).

Для определения точных размеров в полученной 3D-модели необходимо произвести постобработку, которая включает в себя очистку модели от лишних шумов, возникающих при сканировании.

На рис. 4 представлена 3D-модель отсканированной тормозной колодки, которая позволяет детально изучить геометрию колодки, включая ее износ и дефекты [4–12].



Рис. 2. Выбор тормозных колодок
Fig. 2. Selecting brake pads



Рис. 3. Внешний вид сканера RangeVision Spectrum
Fig. 3. External appearance of the scanner RangeVision Spectrum

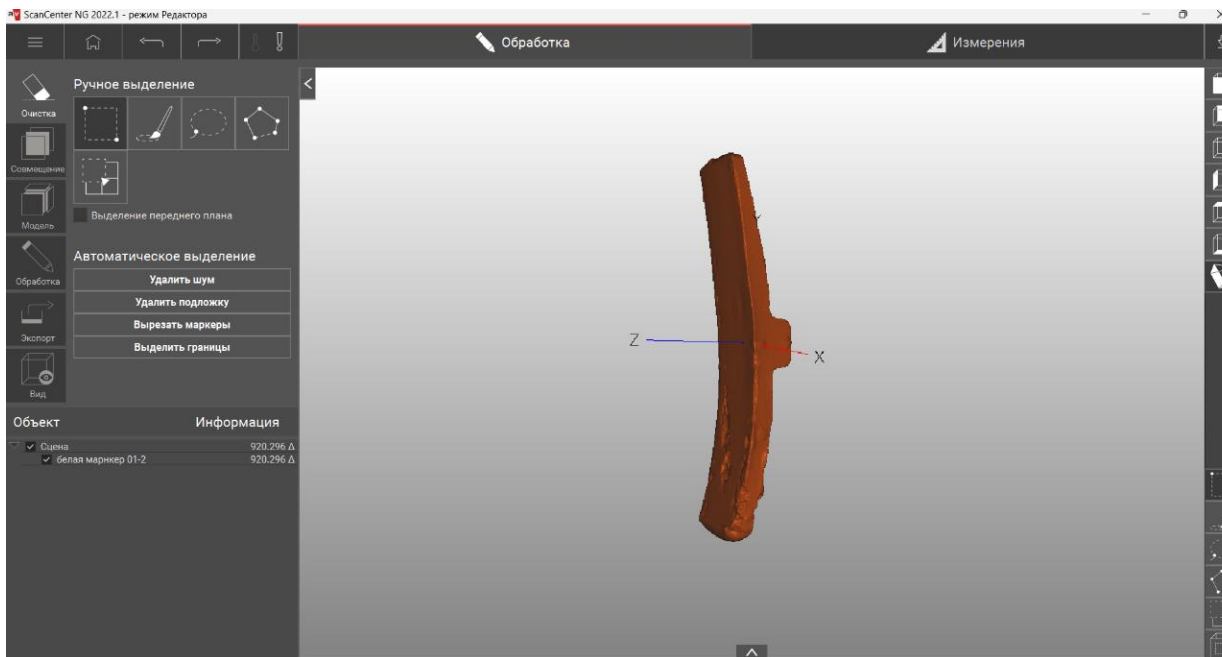


Рис. 4. Удаление лишних элементов
Fig. 4. Removing unnecessary elements

Следующим этапом построения профилограмм является процесс получения профиля сечения тормозной колодки.

Этот процесс осуществлялся путем сечения 3D-модели тормозной колодки перпендикулярной плоскостью по всей длине с определенным шагом.

На рис. 5 представлено построение плоскости сечения колодки путем нанесения линии сечения. Эта линия сечения проходит через 3D-модель колодки и позволяет создать двухмерный разрез колодки в заданной плоскости.

На рис. 6 представлено построение профиля сечения тормозной колодки в виде двухмерного изображения пересечения колодки плоскостью сечения, которая была построена ранее.

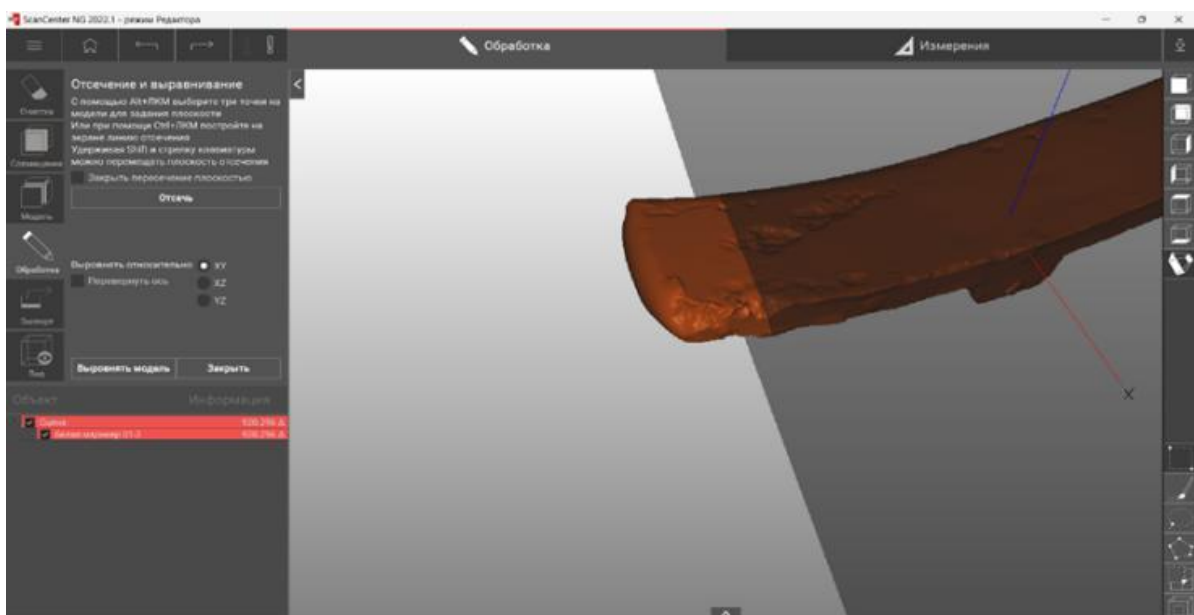


Рис. 5. Построение плоскости сечения колодки
Fig. 5. Construction of the section plane of the pad

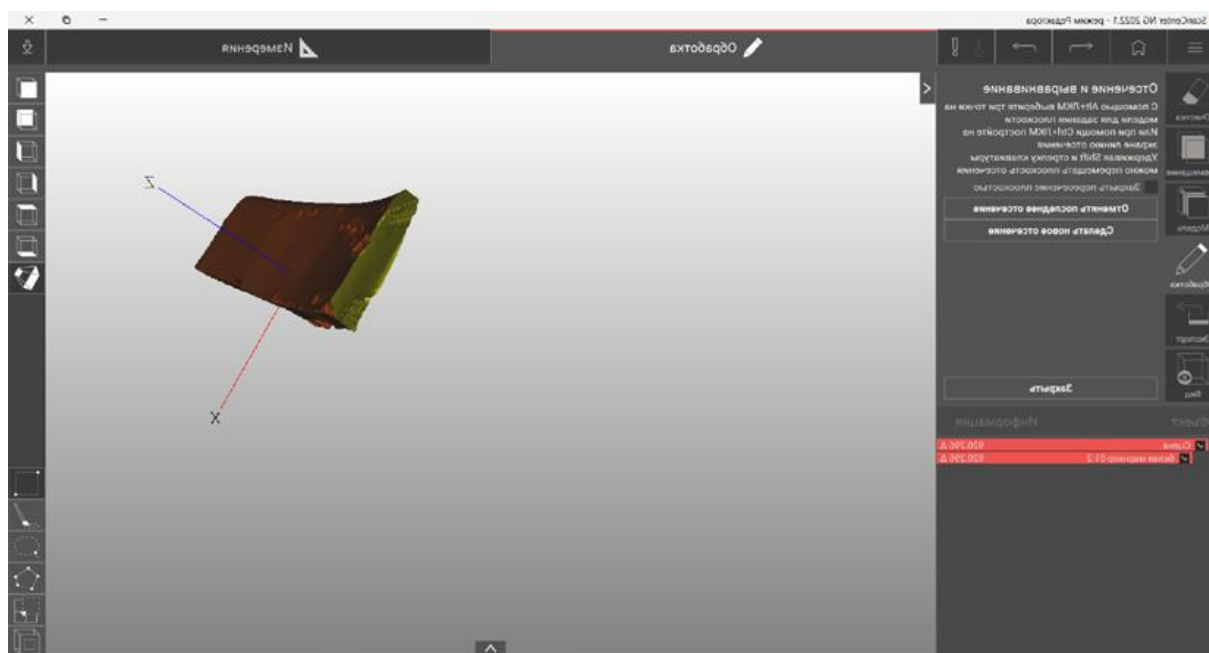


Рис. 6. Построение профиля сечения тормозной колодки
Fig. 6. Construction of the brake pad cross-section profile

После процесса отсечения приступим к экспорту 3D-модели в формате STL для удобства открытия в CAD-программе (рис. 7).

Экспорт трехмерной модели в формат STL является стандартной практикой, когда необходимо перенести сложные геометрические формы в CAD-программы для дальнейшего просмотра, анализа или модификации. Формат STL под-

держивается большинством программ для трехмерного моделирования. Его использование позволяет передавать детализированные данные о поверхностях объекта, что нужно для точных инженерных расчетов и планирования производственных процессов. В программе ScanCenter NG выбираем вкладку экспорт, задаем имя файлу, указываем путь его сохранения и

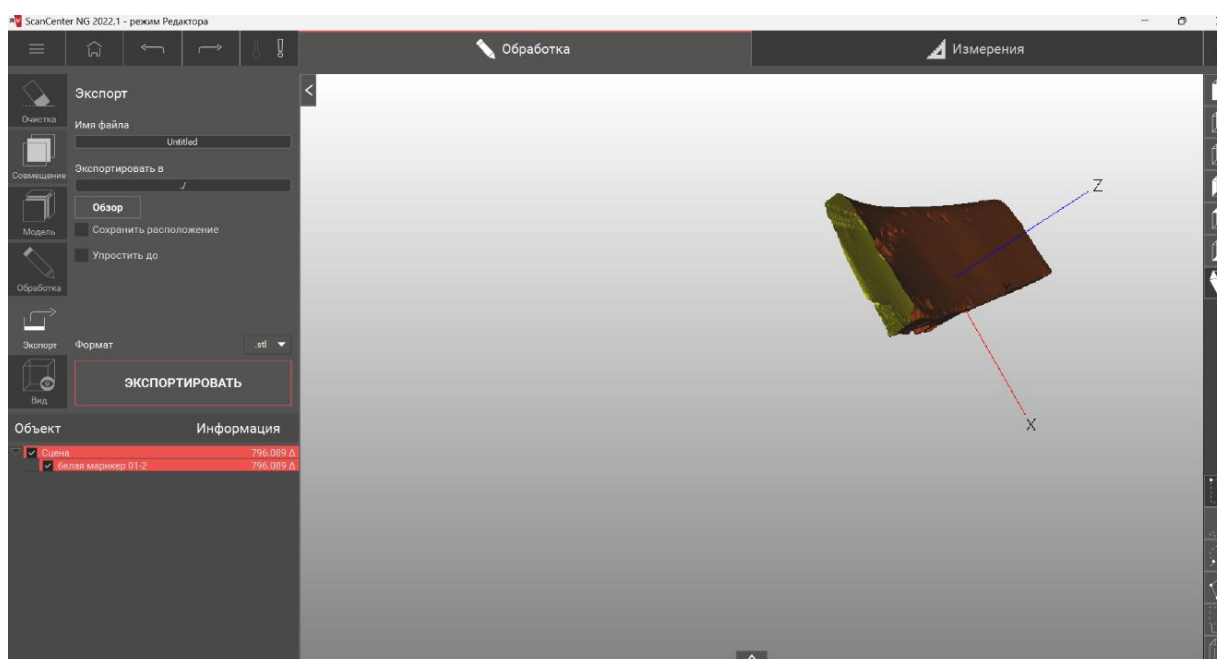


Рис. 7. Экспорт 3D-модели тормозной колодки
Fig. 7. Export of 3D model of brake pad

выбираем формат, в котором необходимо сохранить для работы в CAD-программах, следовательно, выбираем формат STL.

Произведем копирование контура в программе и экспортируем в программный комплекс «Компас» (рис. 8).

Для воспроизведения и детальной работы с контуром в программе «Компас» сначала необходимо скопировать контур из исходного CAD-файла. Затем экспортируемый контур можно импортировать в программный комплекс «Компас», который позволяет провести

дальнейшее моделирование или изменение деталей с высокой точностью. Это обеспечивает удобство работы с проектами и плавный переход от одного этапа проектирования к другому, сохраняя все ключевые параметры геометрии объекта.

Разработанная методика позволяет получать профилограммы тормозных колодок с различной степенью износа с целью дальнейшего их анализа. В рамках работы были отсканированы тормозные колодки с различной степенью износа и получены их профилограммы (рис. 9).

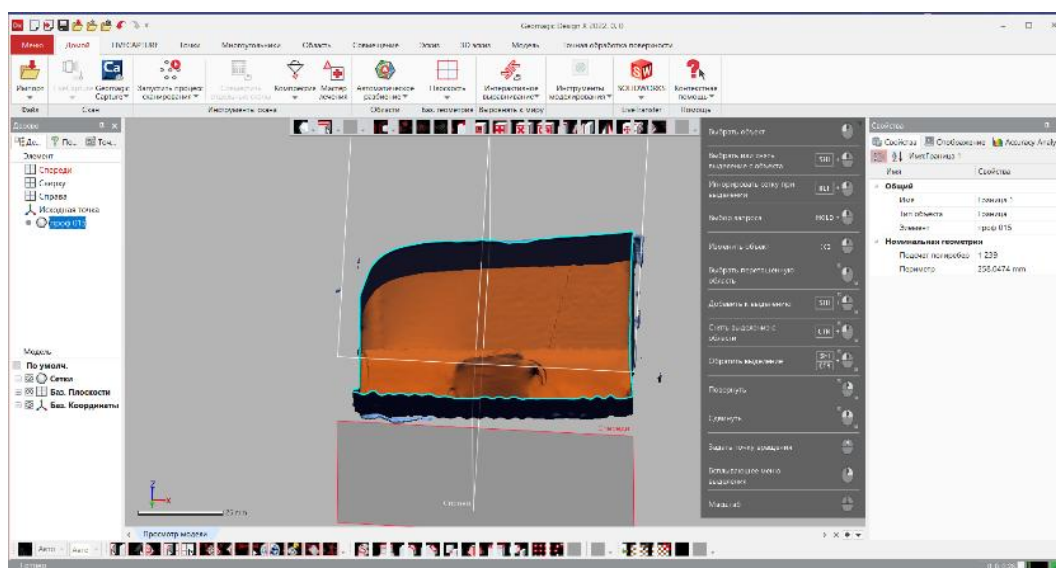


Рис. 8. Копирование контура
Fig. 8. Copying the contour

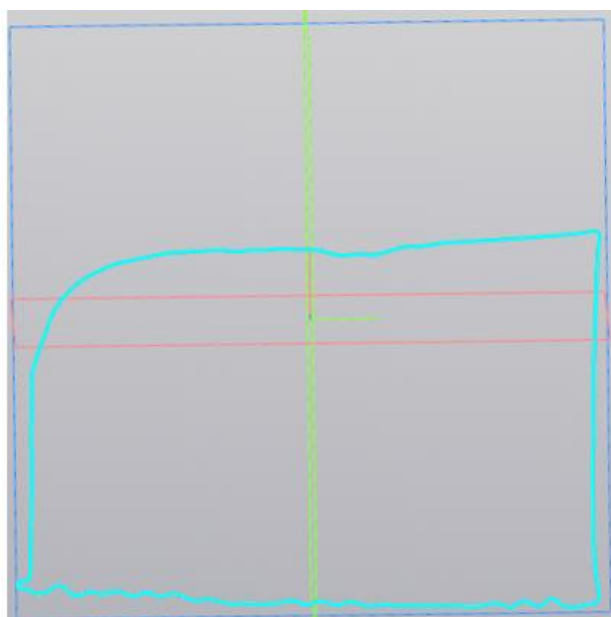


Рис. 9. Полученная профилограмма в программе «Компас»
Fig. 9. The resulting profilogram in the Kompas program

Далее рассмотрим пример проведения анализа тормозной колодки с износом типа «выщерблина» (рис. 10). Профилограммы колодок построены через 1 см. Для большей

наглядности все профилограммы были сведены последовательно и представлены на рис. 11.

На рис. 12 представлены совмещенные профилограммы с сечениями колодки.

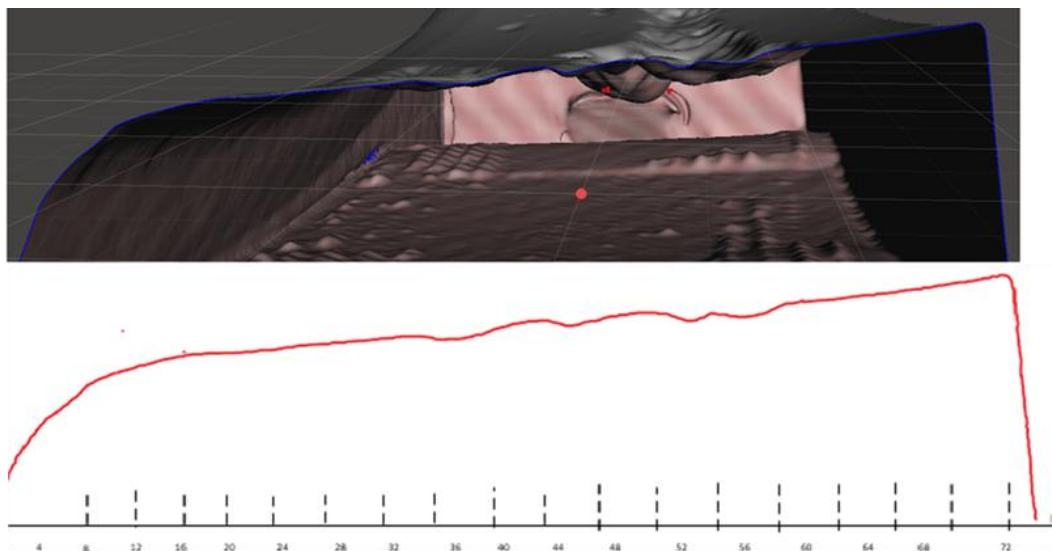


Рис. 10. Построение профилограммы тормозной колодки с сечением (вверху – сечение тормозной колодки, внизу – профилограмма)

Fig. 10. Construction of a profilogram of a brake pad with a section (top – section of the brake pad, bottom – profilogram)

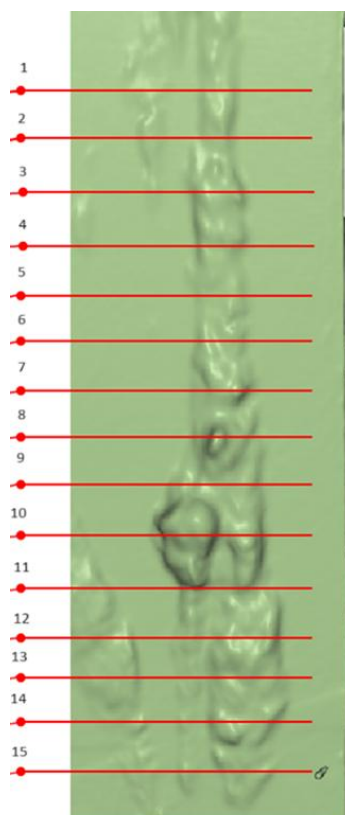


Рис. 11. Поверхность тормозной колодки с разбивкой по сечением для построения профилограмм

Fig. 11. Brake pad surface with a breakdown by section for constructing profilograms

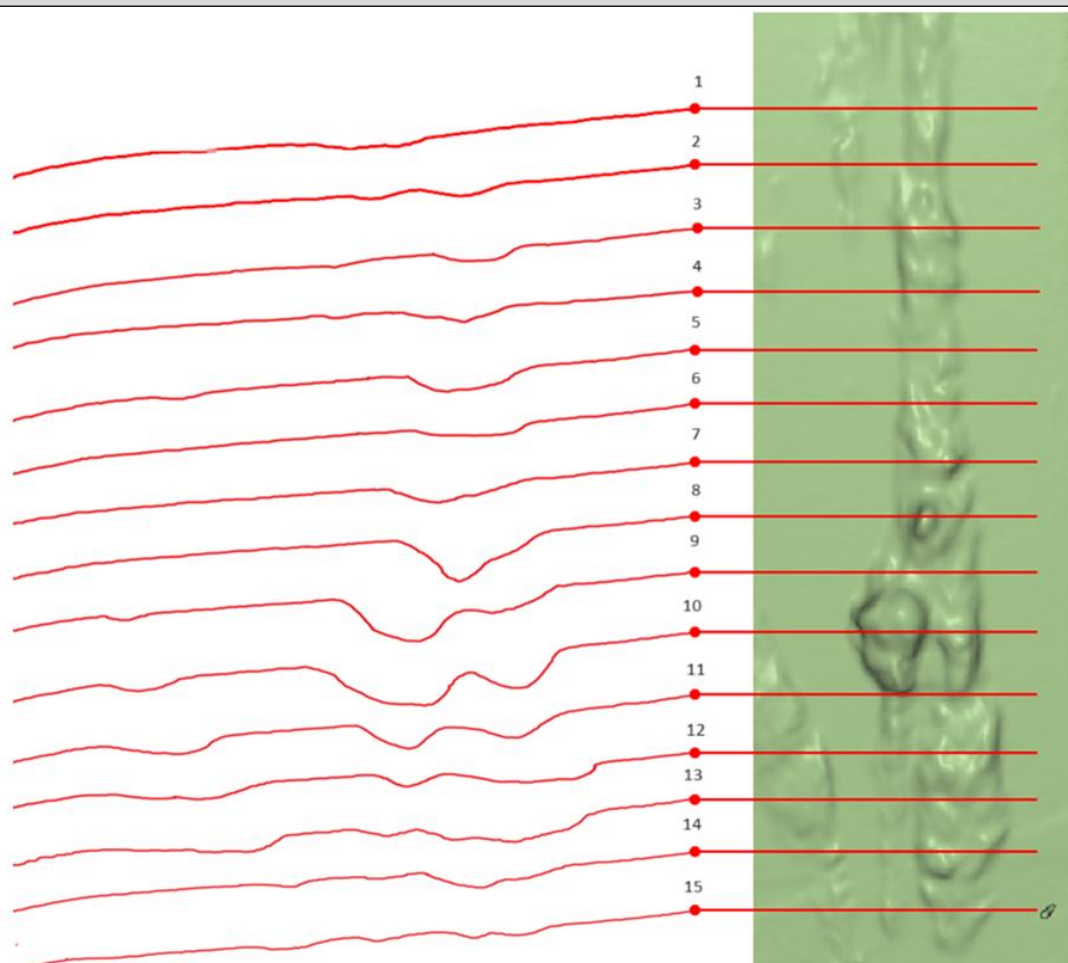


Рис. 12. Профилограммы тормозных колодок
Fig. 12. Brake pad profile diagrams

Анализ профилограмм тормозных колодок является важной процедурой, позволяющей оценить ее состояние и определить степень износа, а также наличие дефектов и их дальнейшее возможное распространение. Основываясь на анализе профилограмм, можно сделать следующий вывод: износ тормозной колодки от краев к центру имеет нарастающий характер, после чего резко увеличивается в зонах с максимальным износом (рис. 12).

Такое неравномерное изнашивание может быть связано с неправильной регулировкой тормозной системы, недостаточной смазкой, неправильным применением тормозных колодок или другими факторами [12–18]. Важно отметить, что неравномерный износ может привести к снижению эффективности торможения и увеличению риска нештатных ситуаций.

Понимание причин неравномерного износа тормозных колодок позволяет разработать меры по предотвращению этого явления, что

способствует более эффективной работе тормозной системы железнодорожного транспорта и, следовательно, повышению его безопасности.

Анализируя рис. 13, можно сделать вывод о будущих распределениях дефектов, дальнейшем износе, спрогнозировать направление износа.

Заключение

Методика построения профилограмм с использованием 3D-сканирования позволяет получать профилограммы тормозных колодок с различной степенью износа с целью дальнейшего их анализа на предмет выявления закономерностей этого процесса и прогнозирования остаточного ресурса колодки.

Разработанная методика позволит в дальнейшем выявлять зоны потенциального износа тормозной колодки при наличии определенного вида дефекта, что в конечном итоге будет способствовать установлению зависи-

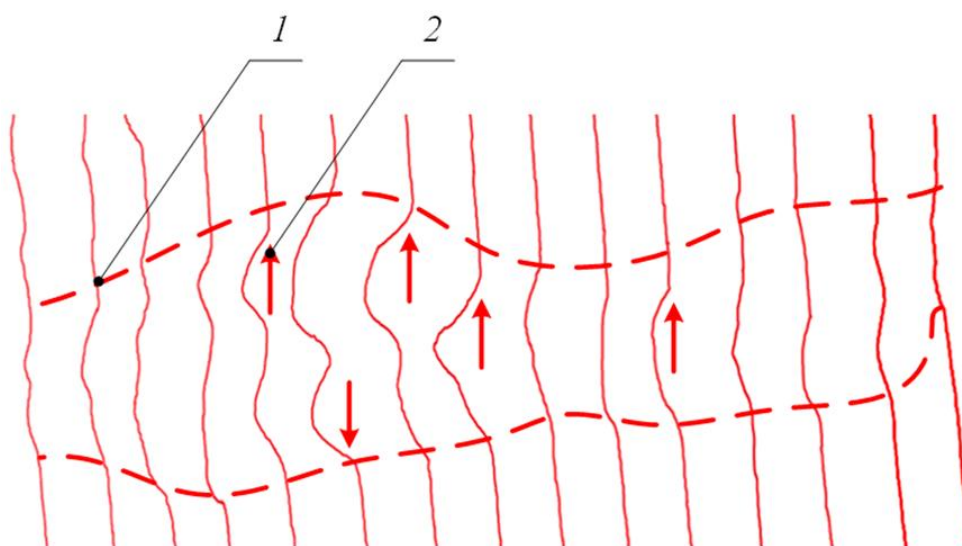


Рис. 13. Развитие дефектов на поверхности тормозной колодки:

1 – зона развития дефекта, 2 – направление развития дефекта

Fig. 13. Development of defects on the surface of the brake pad:

1 – defect development zone; 2 – defect development direction

мости ресурса колодки от конкретного вида износа и его размеров.

Исследование закономерностей формирования износа тормозных колодок при различных режимах эксплуатации (нажатии, изме-

нении состояния поверхностей, запыленности) позволяет в дальнейшем составлять уравнения регрессии для определения остаточного ресурса тормозной колодки.

Список литературы

1. Иванов П.Ю., Дульский Е.Ю., Емельянов Д.О. Реверсивный инжиниринг в исследовании элементов тормозных систем // Вестн. Уральск. гос. ун-та путей сообщ. 2023. № 3 (59). С. 80–86.
2. Пат. 2797930 Рос. Федерация. Стенд для исследования параметров тормозного прижатия колодки к колесу / А.М. Худоногов, Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов и др. № 2022118561 ; заявл. 06.07.2022 ; опубл. 13.06.2023, Бюл. № 17. 10 с.
3. Пат. 2792609 Рос. Федерация. Способ определения коэффициента трения трибологической пары по потребляемой электрической мощности электропривода / А.М. Худоногов, Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов и др. № 2022111793 ; заявл. 27.04.2022 ; опубл. 22.03.2023, Бюл. № 9. 13 с.
4. Галай Э.И., Рудов П.К. Проблемы торможения пассажирского состава // Локомотив. 2003. № 4. С. 30–32.
5. Карвацкий Б.Л. Общая теория автотормозов. М. : Трансжелдориздат, 1947. 300 с.
6. Попов Е.С., Шинский О.И. Анализ показателей качества колодок тормозных чугуновых и композиционных для железнодорожного подвижного состава // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 27–37.
7. Чебаков М.И., Данильченко С.А., Ляпин А.А. Моделирование контактного взаимодействия железнодорожного колеса и тормозной колодки с учетом износа, тепловыделения от трения и зависимости механических параметров от температуры // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2018. № 4 (200). С. 49–53.
8. Математическая модель работы тормозной системы поезда в процессе торможения с учетом динамики коэффициента трения колодки о колесо и сцепления с рельсом в компьютерной среде / А.А. Корсун, П.Ю. Иванов, С.П. Круглов и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 2 (86). С. 104–113.
9. РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар вагонов с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524 мм) : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств - участников Содружества от 19–20 окт. 2017 г. № 67 (ред. от 10.06.2024). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
10. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотра вагонов) № 808-2022-ПКБ-ЦВ: утв. Советом по железнодорожному транспорту Государств-участников Содружества от 8 дек. 2022 г. № 77 (ред. 10.06.2024). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
11. Венцевич Л.Е. Тормоза подвижного состава железных дорог. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2010. 560 с.
12. Крылов В.И., Клыков Е.В., Ясенцев В.Ф. Тормоза подвижного состава. М. : Транспорт, 1980. 271 с.
13. Пархомов В.Т. Устройство и эксплуатация тормозов. М. : Транспорт, 1994. 208 с.
14. Прогнозирование ресурса вновь проектируемых тормозных механизмов с учетом инновационных инженерных решений / Д.Г. Мясичев, С.П. Горбатов, А.С. Вашуткин и др. // Изв. СПб. лесотехнич. акад. 2021. № 234. С. 182–197.

15. Американские железнодорожные энциклопедии: вагоны / под ред. П.И. Травина. М. : Трансжелдориздат, 1937. 844 с.
16. The braking performance of pads for high-speed train with rigid and flexible structure on a full-scale flywheel brake dynamometer / W. Zhong, X. Zhang, Zh. Wang et al. // Tribology International. 2023. Vol. 179. DOI 10.1016/j.triboint.2022.108143.
17. 3D dynamic model of the railway wagon to obtain the wheel–rail forces under track irregularities / M. Naeimi, A.Z. Jabbar, M. Shadfar et al. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. 2015. Vol. 229. Iss. 4. P. 357–369. DOI 10.1177/1464419314566833.
18. Talati F., Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system // Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 45. P. 1047–1059. DOI <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0476-y>.

References

1. Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu., Emel'yanov D.O. Reversivnyi inzhiniring v issledovanii elementov tormoznykh system [Reverse engineering in the study of brake system elements]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2023, no 3 (59), pp. 80–86.
2. Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Emel'yanov D.O., Korsun A.A., Khamnaeva A.A., Kovshin A.S. Patent RU 2797930 C1, 13.06.2023.
3. Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Emel'yanov D.O., Korsun A.A., Khamnaeva A.A., Kovshin A.S., Treskin S.V. Patent RU 2792609 C1, 22.03.2023.
4. Galai E.I., Rudov P.K. Problemy tormozheniya passazhirskogo sostava [Problems of passenger train braking]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2003, no 4, pp. 30–32.
5. Karvatskii B.L. Obshchaya teoriya avtotormozov [The general theory of auto brakes]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1947. 300 p.
6. Popov E.S., Shinskii O.I. Analiz pokazatelei kachestva kolodok tormoznykh chugunnykh i kompozitsionnykh dlya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Analysis of quality indicators of cast iron and composite brake pads for railway rolling stock]. *Lit'e i metallurgiya* [Casting and metallurgy], 2021, no 1, pp. 27–37.
7. Khebakov M.I., Danil'chenko S.A., Lyapin A.A. Modelirovanie kontaktnogo vzaimodeistviya zheleznodorozhnogo koleasa i tormoznoi kolodki s uchedom iznosa, teplovydeleniya ot treniya i zavisimosti mekhanicheskikh parametrov ot temperatury [Modeling of the contact interaction of a railway wheel and a brake pad, taking into account wear, heat release from friction and the dependence of mechanical parameters on temperature]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki* [Bulletins of Higher Educational Organizations. The North Caucasus region. Series: Natural Sciences], 2018, no 4 (200), pp. 49–53.
8. Korsun A.A., Ivanov P.Yu., Kruglov S.P., Osipov D.V., Emel'yanov D.O. Matematicheskaya model' raboty tormoznoi sistemy poezda v protsesse tormozheniya s uchedom dinamiki koeffitsienta treniya kolodki o koleso i stsepleniya s rel'som v komp'yuternoi srede [A mathematical model of the operation of the train's braking system during braking, taking into account the dynamics of the friction coefficient of the pad on the wheel and the coupling with the rail in a computer environment]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2022, no 2 (86), pp. 104–113.
9. RD VNIIZhT 27.05.01-2017. Rukovodyashchii dokument po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kolesnykh par vagonov s buksovymi uzlamy gruzovykh vagonov magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 (1524 mm): utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv - uchastnikov Sodruzhestva (Protokol ot 19–20 oktyabrya 2017 g. N 67 (red. ot 10.06.2024) [RD VNIIZHT 27.05.01-2017. Guidance document of the repair and maintenance of wheel sets of wagons with axle boxes of freight wagons of mainline railways of gauge 1520 (1524 mm): approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States (Protocol No 67 dated October 19–20, 2017 (ed. June 10, 2024)].
10. Instruksiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu vagonov v ekspluatatsii (instruksiya osmotrshchiku vagonov) № 808-2022-PKB-TsV: utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu Gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva ot 08.12.2022 g. № 77 (red. 10.06.2024) [Instructions for the maintenance of wagons in operation (instructions to the inspector of wagons) No 808-2022-PKB-TsV: approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol No 77 dated December 8, 2022 (ed. June 10, 2024)].
11. Ventsevich L.E. Tormoza podvizhnogo sostava [Brakes of rolling stock of railways]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2010. 560 p.
12. Krylov V.I., Klykov E.V., Yasentsev V.F. Tormoza podvizhnogo sostava [Brakes of rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1980. 271 p.
13. Parkhomov V.T. Ustroistvo i ekspluatatsiya tormozov [Device and operation of brakes]. Moscow: Transport Publ., 1994. 208 p.
14. Myasishchev D.G., Gorbato S.P., Vashutkin A.S., Lorenz A.S. Prognozirovanie resursa vnov' proektiruemykh tormoznykh mekhanizmov s uchedom innovatsionnykh inzhenernykh reshenii [Forecasting the resource of newly designed braking mechanisms, taking into account innovative engineering solutions]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii* [Bulletins of the Saint Petersburg Forestry Academy], 2021, no 234, pp. 182–197.
15. Amerikanskie zheleznodorozhnye entsiklopedii: vagony [American Railway Encyclopedias: wagons]. Ed. Travin P.I. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1937. 844 p.
16. Zhong W., Zhang X., Wang Zh., Zhang X., Yan Q. The braking performance of pads for high-speed train with rigid and flexible structure on a full-scale flywheel brake dynamometer // Tribology International. 2023. Vol. 179. DOI

10.1016/j.triboint.2022.108143.

17. Naeimi M., Jabbar A.Z., Shadfar M., Esmaili M. 3D dynamic model of the railway wagon to obtain the wheel–rail forces under track irregularities // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2015, Vol. 229, iss. 4, pp. 357–369. DOI 10.1177/1464419314566833.

18. Talati F., Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system // Heat and Mass Transfer, 2009, Vol. 45, pp. 1047–1059. DOI <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0476-y>.

Информация об авторах

Коновалов Владислав Романович, аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: konovalovvlad190@gmail.com.

Дульский Евгений Юрьевич, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: e.dulskiy@mail.ru.

Емельянов Денис Олегович, аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: emelyanovdenis1995@mail.ru.

Буйносов Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрической тяги, Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург; e-mail: byinosov@mail.ru.

Information about the authors

Vladislav R. Konovalov, Ph.D. Student of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: konovalovvlad190@gmail.com.

Evgenii Yu. Dul'skii, Doctor in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: e.dulskiy@mail.ru.

Denis O. Emel'yanov, Ph.D. Student of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: emelyanovdenis1995@mail.ru.

Alexander P. Buinosov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Traction, Ural State Transport University, Yekaterinburg; e-mail: byinosov@mail.ru.