

Прибор и метод теплового воздействия для контроля и изучения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов

А.Г. Ларченко^{1a}, А.П. Белых^{2b}, Н.Г. Филиппенко^{1c}, Д.В. Баканин^{1d}

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

² ООО «Транспортная компания ВагонСервис», Иркутск

^a Larchenko_ag@inbox.ru, ^b belikh_ap@mail.ru, ^c pentagon@mail.ru, ^d denis.bakan@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-9640-0986>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0123-0954>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7557-7774>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-8055-1985>

Статья поступила 02.09.2021, принята 16.09.2021

В статье дается характеристика композиционных материалов, используемых при изготовлении деталей подвижного состава. Представлен анализ основных неисправностей тормозных колодок и рабочей поверхности катания колеса. Приводятся производственные данные, рассматриваются основные дефекты, возникающие при эксплуатации и приводящие к увеличению воздействия, оказываемого колодкой на колесо, и, как следствие, к интенсивному износу поверхности катания. Представлен анализ, который указывает на необходимость исследования физико-механических характеристик композиционных материалов с целью улучшения технологических свойств и формирования дальнейших рекомендаций по эксплуатационным режимам. Описывается экспериментальная установка, позволяющая изучить термическое воздействие на изделия из композита. В работе рассматривается вопрос о фазовых переходах, что позволяет установить температурный диапазон, в котором полимер имеет достаточные механические свойства и может эксплуатироваться без негативных воздействий на сопряженную деталь и разрушений. Приводится алгоритм контроля полимерных изделий. Представлены результаты экспериментальных исследований в виде зависимости величины линейного теплового расширения от температуры. Сделаны выводы, поставлены задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: контроль; тормозные колодки; композиционные материалы; дефекты; подвижной состав; термическое воздействие; физико-механические свойства; полимеры.

Device and method of thermal exposure for control and study of physical and mechanical characteristics of polymeric composite materials

A.G. Larchenko^{1a}, A.P. Belykh^{2b}, N.G. Filippenko^{1c}, D.V. Bakanin^{1d}

¹ Irkutsk State Transport University, st. Chernyshevsky 15, Irkutsk, Россия

² ООО «TKVS», Irkutsk

^a Larchenko_ag@inbox.ru, ^b belikh_ap@mail.ru, ^c pentagon@mail.ru, ^d denis.bakan@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-9640-0986>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0123-0954>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7557-7774>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-8055-1985>

Статья поступила 02.09.2021, принята 16.09.2021

In this scientific work, the characteristics of composite materials used in the manufacture of rolling stock parts are given. The analysis of the main malfunctions of brake pads and the working surface of the wheel tread is presented. Production data are presented, the main defects arising during operation and leading to an increase in the impact exerted by the shoe on the wheel, and, as a consequence, to intensive wear of the rolling surface are considered. The paper presents an analysis that shows the need for research in the field of studying the physical and mechanical characteristics of composite materials in order to improve the technological properties and form further recommendations for operating conditions. An experimental setup is described that makes it possible to study the thermal effect on composite products. The paper deals with the issue of phase transitions, which makes it possible to establish the temperature range in which the polymer has sufficient mechanical properties and can be operated without negative effects on the mating part and destruction. The article gives an algorithm for the control of polymer products and presents the results of experimental studies in the form of the dependence of the value of linear thermal expansion on temperature. Conclusions are drawn, tasks for further research are set.

Keywords: control; brake pads; composite materials; defects; rolling stock; thermal effects; physical and mechanical properties; polymers.

Введение. Использование композиционных полимерных материалов в производственном процессе изготовления и ремонта подвижного состава позволяет увеличить долговечность узлов с учетом уменьшения нагрузки на ось и существенно сократить затраты на изготовление и ремонт. Помимо полиамидных сепараторов, фрикционных накладок и полимерных втулок в последние десятилетия на сети железных дорог активно применяются композиционные тормозные колодки с металлической спинкой и сетчатым проволочным каркасом. Их изготавливают по определенной технологии методом напрессовки из асбокаучуковых материалов. Несмотря на большую номенклатуру сырья и материалов, применяемых для производства композиционных колодок, их основные эксплуатационные характеристики равны. Существуют факторы, сдерживающие их широкое распространение. К ним относят недостаток научно-исследовательских направлений в области изучения физико-механических характеристик [1–6], а также отсутствие методик контроля данных изделий после изготовления и использования. Теоретические исследования говорят о том, что именно низкая теплопроводность композиционных колодок приводит к образованию дефектов при эксплуатации с сопутствующим процессом наволакивания металла [2; 3]. Наволакивание происходит при взаимодействии и схватывании контактирующих поверхностей в результате пластической деформации и под воздействием высоких температур [5]. Согласно акту-рекламации № 1451 на узлы и детали вагона, не выдерживающие гарантийного срока после изготовления и ремонта, на станции Иркутск-Сортировочный в ходе осмотра колесной пары № 1226-17699-2018 обнаружен неравномерный износ гребней. Причиной послужила разность диаметров колес на одной оси 5 мм при норме не более 1 мм. Ин-

тенсивный износ поверхности катания произошел в результате взаимодействия с полимерной колодкой, в которой зафиксированы металлические включения и пористость (рис. 1).



Рис. 1. Интенсивный износ поверхности катания (3) в результате взаимодействия с полимерной колодкой, в которой зафиксированы металлические включения (2) и пористость (1)

Экспериментальный опыт использования тормозных колодок [6] говорит о том, что независимо от сырья и материала, из которого изготавливается колодка, а также изготовителя, в ходе осмотра после эксплуатации выявляются дефекты различного характера (рис. 2), негативно влияющие на площадь контакта при колодочном торможении.



Рис. 2. Доля выявленных дефектов в процессе использования тормозных колодок в опытном поезде «РЖД-УВЗ-УргУПС Мониторвагонтранс»

Постановка цели. Использование метода теплового воздействия при изучении свойств материалов и контроле. Проведенный анализ показывает необходимость исследования физико-механических характеристик не только материалов для изготовления колодок, но и композитов в целом. Исследования в данной области, а так-

же формирование рекомендаций по изготовлению и эксплуатации позволят предотвратить возможное образование термомеханических дефектов. Изучение фазовых переходов при изменении температуры позволяет установить температурный интервал, в котором определенный полимер имеет достаточную механическую проч-

ность и может эксплуатироваться без негативных воздействий на сопряженную деталь и разрушений [4–20]. Нельзя не отметить, что возможны и технологические дефекты в виде металлических включений и нарушений сплошности, приводящие к снижению заявленного ресурса изделий, которые также необходимо контролировать [14]. В связи с изложенным в работе поставлена цель изучить термическое воздействие на изделия из композита для исследования теплофизических свойств и возможного выявления дефектов. Температуропроводность является наименее изученной теплофизической характеристикой полимеров. В литературных источниках в настоящее время отсутствуют систематические исследования, охватывающие большую номенклатуру полимеров в широком интервале температур и давления. Значения удельной теплоемкости полимеров в широком диапазоне температур дают представления о состояниях полимеров и их фазовых переходах. По результатам измерений теплоемкости можно рассчитать значения энтропии, энтальпии, свободной энергии и определить изменение этих термодинамических величин при переходе полимера из одной фазы в другую.

При осуществлении исследования важной ступенью являлось конструирование экспериментальной установки (см. рис. 3), предусматривающей равномерное термическое воздействие с заданной мощностью с целью нагрева до температуры разогрева, которая не превышает 84–90 % от значения температуры плавления [4; 9; 13]. Нагрев изделия предполагалось производить равномерно по всей поверхности как в стеклянной емкости-колбе (1), так и через нагретую металлическую подставку (2) (рис. 3, 4). Основанием для установки послужил корпус толщинометра (3) с удобным креплением микрометра (4). Во избежание нагрева поверхности самого основания, были использованы теплоизоляционные материалы (5). Полученная экспериментальная установка предназначена для определения температуры плавления, теплового расширения, фазовых превращений и выявления дефектов. Установка позволяет исследовать одновременно два опытных образца. Один из них — на теплофизические свойства (температура плавления, тепловое расширение), путем помещения образца на нагревательный элемент, и сверху на поверхность опускается шток (6). Электронный микрометр (4), соединенный индентором со штоком, устанавливается в нулевое положение. При нагреве в процессе испытаний температурные расширения опытного образца через шток будут оказывать воздействие на индентор микрометра и выдавать данные по линейному тепловому расширению. Второй образец испытывается методом термодеструкции, позволяющим говорить о наличии дефектов. Алгоритм реализации контроля представлен на рис. 5.

Для регистрации динамики выделения газа при контроле объекта с нарушением сплошности в реальном времени оценивается уровень жидкости в манометре (7). Для организации точности измерений и исключения человеческого фактора в манометр был опущен цилиндрический поплавок (8) с магнитом, снаружи к трубке

манометра относительно этого поплавка приклеен датчик Холла.

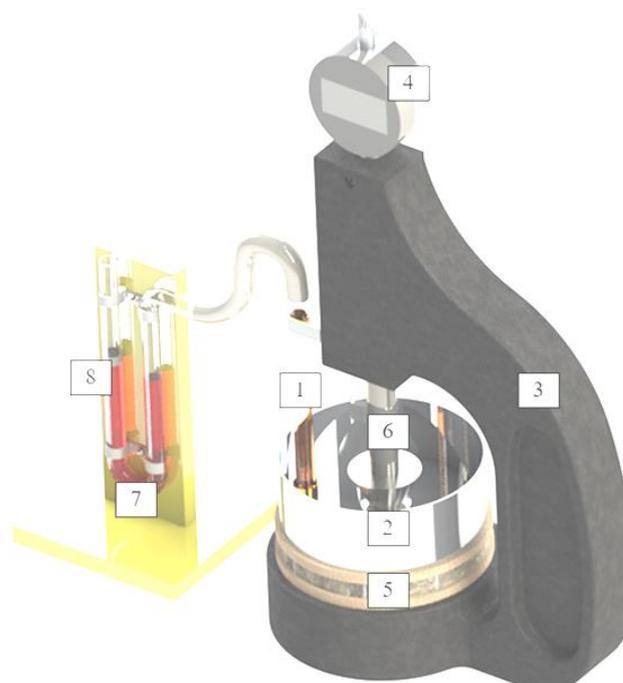


Рис. 3. Общий вид конструкции устройства: 1 — емкость-колба; 2 — металлическая подставка; 3 — корпус; 4 — микрометр; 5 — теплоизоляционные материалы; 6 — шток; 7 — манометр; 8 — поплавок с датчиком

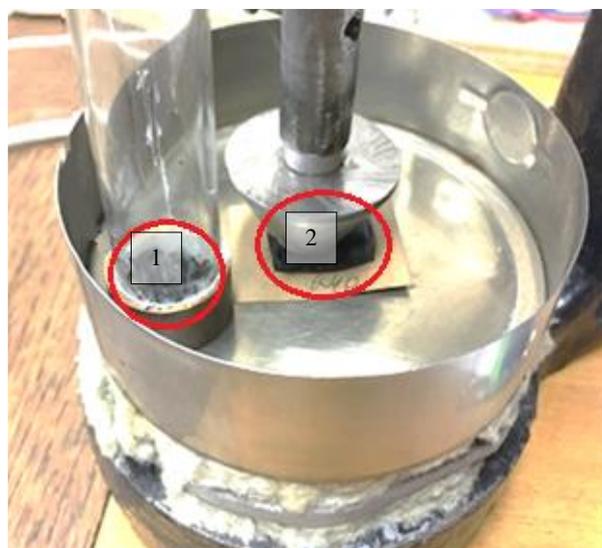


Рис. 4. Расположение на нагревательном элементе объектов контроля: 1 — в стеклянной емкости-колбе; 2 — нагрев через металлическую подставку

В результате при увеличении уровня капельной жидкости в манометре поплавок начнет подниматься вверх, изменяя магнитное поле и тем самым воздействуя на датчик Холла; датчик, в свою очередь, передает измерения давления на микроконтроллер. В ходе исследований был разработан блок автоматизации и создано программное обеспечение для реализации процес-

са контроля и изучения физико-механических характеристик.

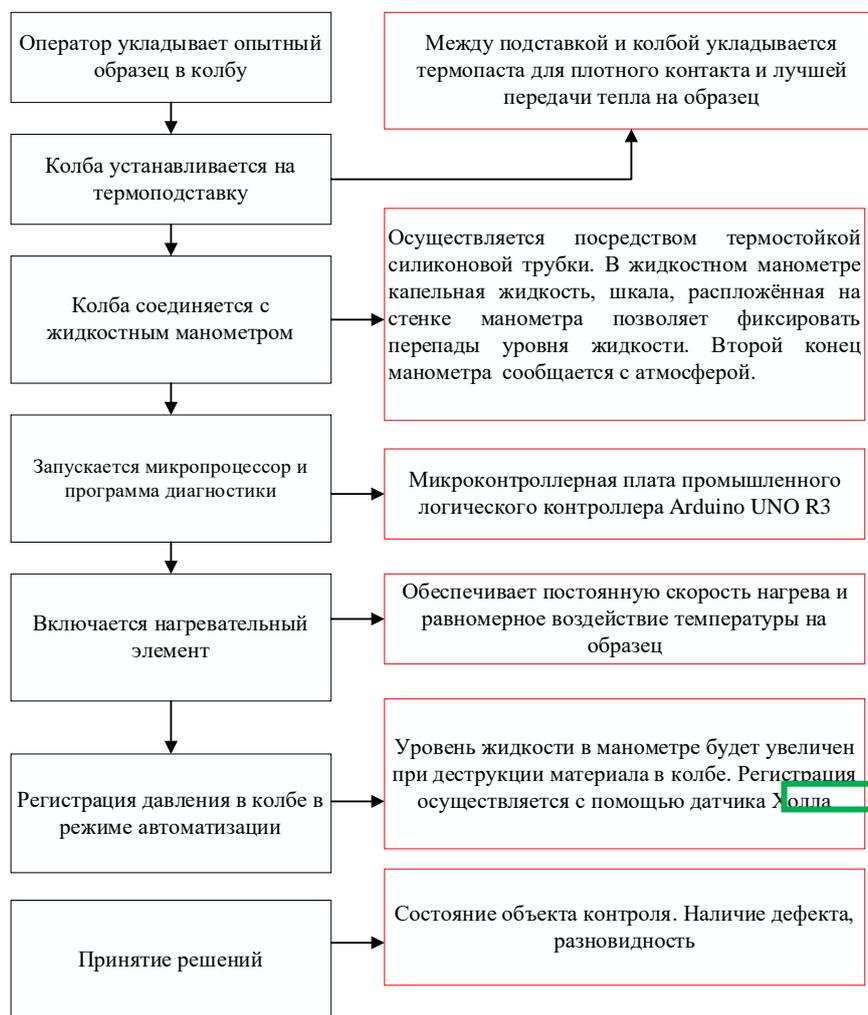


Рис. 5. Алгоритм контроля полимерных изделий

На представленном устройстве на данный момент проведены экспериментальные пробы. Первые испытания были посвящены изучению влияния температуры на теплофизические свойства композитных материалов. Некоторые результаты в виде зависимости величины линейного теплового расширения от температуры представлены на рис. 6, 7. В начале разогрева полиуретана (рис. 6) идет постепенное расширение образца до температуры 160 °С, после расширение становится более интенсивным. При достижении максимальной температуры (240 °С) полимер начинает терять термостойкость, происходит его плавление. ПВХ — очень мягкий материал (рис. 7). Происходит не расширение, а сжатие образца, что немаловажно при рекомендациях к использованию. На участке от 20 до 140 °С происходит медленное сжатие, а на участке от 140 до 180 °С процесс ускоряется. После 180 °С полимер начинает плавиться. Армамид, согласно испытаниям, в начале разогрева претерпевает постепенное расширение до температуры 160 °С. При

достижении максимальной температуры (220 °С), полимер начинает терять термостойкость.

Заключение. Согласно результатам экспериментальных и теоретических исследований, композиционным материалам присущи три основных состояния со своим комплексом свойств и областью технологического и эксплуатационного применения — стеклообразное, высокоэластичное и вязкотекучее. Каждому состоянию присущ свой диапазон температур, что необходимо учитывать при изготовлении и эксплуатации изделий. От температуры полимерных композиционных материалов напрямую зависят свойства изделий. Температура является одним из основных показателей, необходимых для контроля в процессе производства и использования.

Задачей дальнейших исследований является продолжение экспериментальных проб для изучения физико-механических характеристик широкого диапазона полимерных композиционных материалов с целью отработки и определения зависимости возникновения дефектов

при воздействии температур согласно режиму эксплуатации, а также возможного их предотвращения.

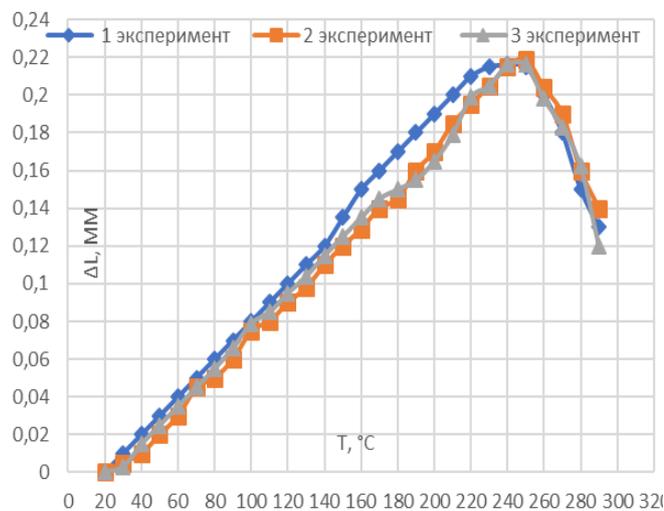


Рис. 6. График зависимости величины линейного теплового расширения от температуры $\Delta l = f(T)$, материал — полиуретан

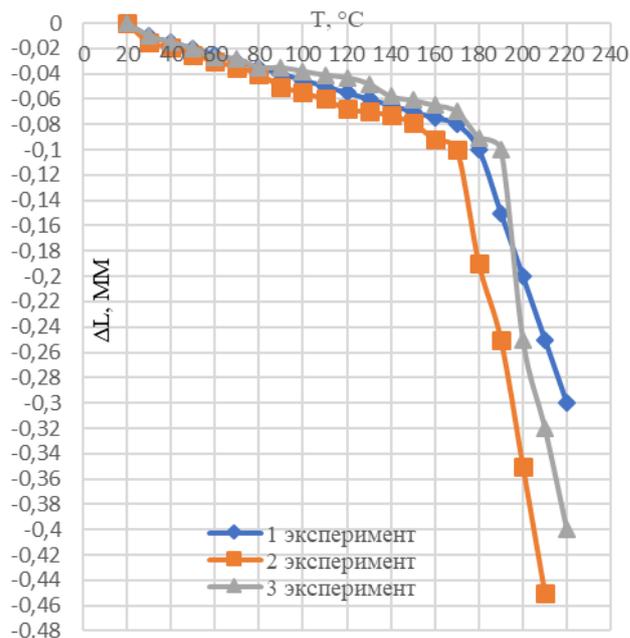


Рис. 7. График зависимости величины линейного теплового расширения от температуры $\Delta l = f(T)$, материал — ПВХ

Литература

1. Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте в России // Труды ВИАМ: электрон. науч. журнал. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=988. (дата обращения: 21.09.2021).
2. Bader H. High frequency drying of porous materials // *Drying Technology*. 1996. V. 14. № 7-8. P. 1499-1523.
3. Hou A. Effect of microwave irradiation on the physical properties and morphological structures of cotton cellulose // *Carbonate Polymers*. 2008. V. 74. P. 934-937.
4. Dew'ey W.C. Rational for use of hyperthermia in cancer therapy // *Ann. New York Acad. Sci.* 1980. V. 335. P. 372-378.
5. Павлюков А.Э., Черепов О.В., Шалупина П.И. Тормозные колодки грузовых вагонов: анализ повреждаемости и факторов, влияющих на создание тормозной силы // *Вестн. Уральского гос. ун-та путей сообщения*. 2017. № 4 (36). С. 4-11.
6. Черепов О.В., Смольянинов А.В., Шувалов В.Ю., Глухих А.Н. Ресурсные испытания композиционных тормозных колодок в опытном поезде «РЖД-УВЗ-УрГУПС Мониторвагонтранс» // *Материалы науч.-технической конф., посвящ. 125-летию Свердловской железной дороги*. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2003. Т. 1. С. 77-84.
7. Butorin D.V., Filippenko N.G., Livshits A.V., Popov S.I. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. P. 012010.
8. Tinga W.R. Dielectric properties of materials for microwave processing - tabulated // *J. of Microwave Power*. 1973. V. 8. № 1. P. 27-33.
9. Samaras G.M. Microwave hyperthermia. Tor cancer therapy // *CRC Critical Reviews in Bioengineering*. 1981. V. 5. № 2. P. 123-184.
10. Metaxas A.C. *Industrial Microwave Heating* // Peter Peregrinus. 1983. P. 111-150.
11. Winders J.J. *Power Transformers: Principles and Applications* - Marcel Dekker, 2002. 286 p.
12. Bader H. High frequency drying of porous materials // *Drying Technology*. 1996. V. 14. № 7-8. P. 1499-1523.
13. Пластмассы СПб. Железнодорожный транспорт. URL: <http://www.plastspb.ru/zheleznodorozhnyj-transport> (дата обращения: 21.09.2021).
14. Butorin D.V. Mathematical modeling of electro hermetic processes on the example of high-frequency welding of the party of polymeric products // *The collection includes 7th International Conference «Recent trend in Science and Technology management»*. London: SCI-EURO, 2018. P. 49-59.
15. Барвинский И.А. Проблемы литья под давлением изделий из ПМ: недолив. М.: Издательский дом «Отраслевые ведомости», 2011. С. 42-46.
16. Bakanin D., Vyckovsky V. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. V. 982. P. 731-740.
17. Ларченко А.Г., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В. Устройство диагностики полиамидных сепараторов методом высокочастотного излучения // *Современ-*

- ные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 4 (44). С. 162-168.
18. Буторин Д.В. Автоматизация управления процессами высокочастотной обработки полимерных материалов разной степени полярности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2018. 20 с.
 19. Дик Е.А., Дик С.А., Ющенко Н.И. Дефекты полимерных материалов на основе реактопластов и способы их ремонта // Актуальные проблемы инженерных наук: материалы VI-й ежегодной науч.-практической конф. преподавателей, студентов и молодых ученых Северо-Кавказского федер. ун-та «Университетская наука-региону» (2-27 апр. 2018 г.). Ставрополь, 2018. С. 36-37.
 20. Макаров А.Г., Киселев С.В., Рыбачук С.В., Зурахов В.С. Критерии надежности прогнозирования вязкоупругости полимерных материалов // Изв. высш. учеб. заведений. Технология легкой пром-сти. 2011. Т. 11. № 1. С. 56-60.
- References*
1. Doriomedov M.S., Daskovskij M.I., Skripachev S.YU. Polymer composite materials in railway transport in Russia // Trudy VIAM: elektron. nauch. zhurnal. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=988. (data obrashcheniya: 21.09.2021).
 2. Bader N. High frequency drying of porous materials // Drying Technology. 1996. V. 14. № 7-8. P. 1499-1523.
 3. Hou A. Effect of microwave irradiation on the physical properties and morphological structures of cotton cellulose // Carbonate Polymers. 2008. V. 74. P. 934-937.
 4. Dew'ey W.C. Rational for use of hyperthermia in cancer therapy // Ann. New York Acad. Sci. 1980. V. 335. P. 372-378.
 5. Pavlyukov A.E., CHerepov O.V., SHalupina P.I. Brake pads for freight cars: analysis of damage and factors affecting the generation of braking force // Herald of the Ural State University of Railway Transport. 2017. № 4 (36). P. 4-11.
 6. CHerepov O.V., Smol'yaninov A.V., SHuvalov V.YU., Gluhih A.N. Resource tests of composite brake pads in the experimental train "RZD-UVZ URGUPS Monitorvagontrans" // Materialy nauch.-tekhnicheskoy konf., posvyashch. 125-letiyu Sverdlovskoj zheleznoj dorogi. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2003. V. 1. P. 77-84.
 7. Butorin D.V., Filippenko N.G., Livshits A.V., Popov S.I. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. P. 012010.
 8. Tinga W.R. Dielectric properties of materials for microwave processing - tabulated // J. of Microwave Power. 1973. V. 8. № 1. P. 27-33.
 9. Samaras G.M. Microwave hyperthermia. Tor cancer therapy // CRC Critical Reviews in Bioengineering. 1981. V. 5. № 2. P. 123-184.
 10. Metaxas A.C. Industrial Microwave Heating // Peter Peregrinus. 1983. P. 111-150.
 11. Winders J.J. Power Transformers: Principles and Applications - Marcel Dekker, 2002. 286 p.
 12. Bader N. High frequency drying of porous materials // Drying Technology. 1996. V. 14. № 7-8. P. 1499-1523.
 13. Plastmassy SPb. Railway transport. URL: <http://www.plastspb.ru/zheleznodorozhnyj-transport> (data obrashcheniya: 21.09.2021).
 14. Butorin D.V. Mathematical modeling of electro hermetic processes on the example of high-frequency welding of the party of polymeric products // The collection includes 7th International Conference «Recent trend in Science and Technology management». London: SCI-EURO, 2018. P. 49-59.
 15. Barvinskij I.A. Problems of molding under pressure of products from PM: underfilling. M.: Izdatel'skij dom «Otraslevye vedomosti», 2011. P. 42-46.
 16. Bakanin D., Bychkovsky V. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. V. 982. P. 731-740.
 17. Larchenko A.G., Filippenko N.G., Livshic A.V. Device for diagnostics of polyamide separators by high-frequency radiation method // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2014. № 4 (44). P. 162-168.
 18. Butorin D.V. Automation of control of high-frequency processing of polymeric materials of different polarity: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Irkutsk, 2018. 20 p.
 19. Dik E.A., Dik S.A., YUshchenko N.I. Defects of polymeric materials based on thermosets and methods for their repair // Aktual'nye problemy inzhenernyh nauk: materialy VI-j ezhegodnoj nauch.-prakticheskoy konf. преподаvatelej, studentov i molodyh uchenyh Severo-Kavkazskogo feder. un-ta «Universitetskaya nauka-regionu» (2-27 apr. 2018 g.). Stavropol', 2018. P. 36-37.
 20. Makarov A.G., Kiselev S.V., Rybachuk S.V., Zurahov V.S. Criteria for the reliability of predicting the viscoelasticity of polymer materials // The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry. 2011. V. 11. № 1. P. 56-60.