

А.Ю. ЧЕРНЯК, Е.О. ГРИНДЕЙ

Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский центр Укрзалізниця», Киев

Е.А. КРАВЧЕНКО, К.А. КРАВЧЕНКО

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Северодонецк

ПРОБЛЕМА ИЗНОСА ТРИБОСИСТЕМЫ «КОЛЕСО – РЕЛЬС»

В статье рассматривается вопрос износа рабочих поверхностей колеса и рельса. Приведен анализ видов изнашивания. Предложен способ улучшения взаимодействия колесной пары тягового подвижного состава с рельсовой колеёй за счет управления температурой в контакте при различных режимах движения.

Ключевые слова: трибосистема «колесо-рельс», изнашивание, песочная система.

A.Y. CHERNYAK, O.O. GRYNDEI

Department of the East Ukrainian Volodymyr Dahl National University, Kiev

K.A. KRAVCHENKO, S.A. KRAVCHENKO

East Ukrainian Volodymyr Dahl National University, Lugansk

THE PROBLEM OF WEAR TRIBOSYSTEM “WHEEL – RAIL”

Abstract - Surfaces of the wheel and rail are largely affecting the operating efficiency of the rolling stock and safe running. Wearing leads to uneven redistribution of loads from the wheelsets to the rails and to decrease of traction qualities and poor dynamics respectively. In addition, the surfaces wearing of the "wheel-rail" system leads to significant material costs for machining or replacing of elements. These costs account both for the owners of the cars (locomotives), and the track service.

The solution of the wearing problem requires a complex approach because, on the one hand, the process of wheel-rail interaction influenced by a large number of factors, on the other hand, during the reduction of friction, on which the wearing depends, traction and braking characteristics may decrease. Efficient operation in the "wheel-rail" system is achieved by controlling the characteristics of the contact. For this purpose the main wear mechanisms were analyzed. There are four types of wearing that bring the greatest harm in friction pairs: abrasion, adhesion, fatigue and oxidative-corrosion.

There is provided the method for improving the condition of interaction of the wheelset with the rail. This method consists in that during the implementation of the reactive effort it is suggested to feed pressurized heated air with an abrasive material into the wheel-rail contact; during braking it is suggested to feed into the cold air with sand; for cleaning out the contact in the contaminated areas it is suggested to supply the compressed air with high temperature; for heating and cooling the air in a sand system it is suggested to use Ranque effect. This procedure will help to stabilize the adhesion in contact and reduce wearing.

Key words: "wheel-rail" tribosystem, wearing, sand system.

Постановка задачи

При взаимодействии колесной пары с рельсовой колеёй в результате трения происходит необратимый процесс изнашивания поверхностей, как колес, так и рельсов. Состояние этих поверхностей в значительной степени оказывает влияние на безопасность движения подвижного состава и эффективность эксплуатации в целом. Износ приводит к неравномерному перераспределению нагрузок от колесных пар на рельсы, соответственно снижению тяговых качеств и ухудшению динамических. Кроме того, износ поверхностей колеса и рельса приводит к значительным материальным затратам на их перепрофилирование или замену при достижении граничных размеров. Эти затраты приходятся как на владельцев подвижного состава, так и на путевые службы.

Анализ исследований

Изнашивание – сложный случайный процесс. Анализ технических решений по снижению интенсивности изнашивания, предложенных разными исследователями [1, 2, 3 и др.], позволяет выполнить их классификацию по четырем группам: конструкционные; технологические; эксплуатационные; содержание пути. В каждой группе предлагаются различные способы по снижению изнашивания, однако проблема износа в системе «колесо–рельс» до сих пор не решена. При решении этой проблемы необходим комплексный подход, т.к. с одной стороны на процесс взаимодействия колеса с рельсом оказывают влияние значительное количество факторов, с другой стороны при снижении трения, от которого напрямую зависит изнашивание, могут ухудшаться тягово-цепные и тормозные характеристики подвижного состава. Эффективная работа в системе «колесо-рельс» достигается за счет управления характеристиками контакта.

Известно, что взаимодействие колеса с рельсом может происходить в контакте (рис. 1) [4, 5, 6]:

- колеса и рабочей поверхности рельса;
- гребня колеса с боковой поверхности головки рельса.

Для каждого пятна контакта характерны свои условия взаимодействия. В контакте гребня колеса и боковой поверхности головки рельса необходимо снижать трение, в контакте обод колеса и рабочей поверхности рельса необходимо повышать сцепление, что приводит к повышению трения и изнашивания.

Колеса, имеющие меньшую твердость по сравнению с твердостью рельса, больше подвергаются изнашиванию. При изнашивании первой по ходу движения колесной пары возможно появление значительной разницы диаметров колес между колесными парами тележки, что часто обуславливает необходимость обточки всех колесных пар, т.к. это влияет на перераспределение нагрузок, а значит на реализацию тяговых усилий и динамику локомотива.

Изнашивание поверхностей возникает как при перемещении колеса по рельсу – при этом происходят разнофакторные процессы в зависимости от вида трения, так и в состоянии покоя – возникает смятие неровностей под действием вертикальной силы [7, 8]. Смятие шероховатостей приводит к изменению площади контакта. Различают номинальную, контурную и фактическую площади контакта [9,

10] (рис. 1).

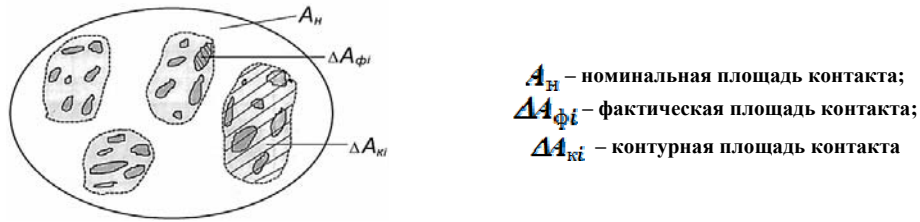


Рис. 1. Площадь контакта

При движении колеса по рельсу в контакте возникает трение, которое классифицируют по [11]:

- *виду взаимного движения тел* – трение скольжения, качения и верчения.
- *наличию или отсутствию третьего тела в контакте* – чистые поверхности, замасленные или покрытые другими видами загрязнения;
- *месту локализации процесса трения* – внешнее и внутренние виды трения.

В зависимости от видов трения различают виды изнашивания. Согласно ГОСТ 27764-88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения» все виды изнашивания классифицируют на 3 группы, которые указаны в табл. 1 [12].

Таблица 1

Виды изнашивания по ГОСТ 27764-88

1	Механическое изнашивание	в контакте	Адгезионное	Изнашивание при заедании
			Абразивное	
			Усталостное	
			Изнашивание при фреттинге	
		внешнее воздействие на поверхности трения	Эрозионное	Гидроабразивное Газоабразивное Гидроэрозионное Газоэрозионное Кавитационное
2	Коррозионно-механическое изнашивание	Окислительное	Изнашивание при фреттинг-коррозии	
		Изнашивание при фреттинг-коррозии		
3	Изнашивание под действием электрического тока	Электроэрозионное		

В трибосопряжениях наиболее широко распространены 4 вида изнашивания [13, 14]: абразивное; адгезионное; усталостное; коррозионное.

Согласно исследований [15] при взаимодействии стальных поверхностей частота появлений абразивного изнашивания наивысшая (рис. 2).



Рис. 2. Частота появления видов изнашивания при взаимодействии стальных поверхностей

Механизмы изнашивания

Абразивное изнашивание происходит в результате режущего или царапающего действия твердых абразивных частиц, образовавшихся в результате трения или загрязнения поверхностей взаимодействия. Эти частицы имеют большую твердость, чем твердость поверхности трения, пластически деформируют поверхность трения, образуя на них риски и царапины.

Абразивное изнашивание, можно разделить на 2 типа [16]:

первый – две чистые поверхности взаимодействуют между собой, при этом происходит срезание шероховатостей более мягкого металла (рис. 3, а).

второй – при наличии абразивной частицы, при этом срезание происходит либо обеих

поверхностей, либо одной (рис. 3, б).

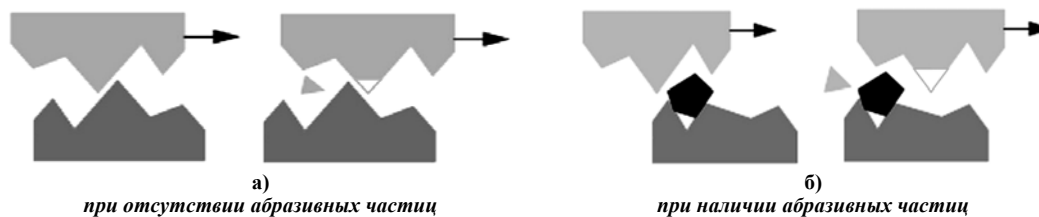


Рис. 3. Абразивное изнашивание

Скорость изнашивания в абразивной среде зависит от концентрации, размеров, формы и свойств абразивов, свойств металлических поверхностей, скорости скольжения и удельного давления и достигает 0,5-5,0 мкм/ч [17].

Адгезионное изнашивание. Реальная поверхность металла всегда имеет некоторую волнистость и многочисленные микровыступы, поэтому контактирование двух поверхностей происходит лишь в отдельных выступающих точках. Трение двух металлических поверхностей под некоторой нагрузкой происходит в условиях пластической деформации металла в точках фактического контакта, развитие которой сопровождается сближением поверхностей вплоть до активации сил сцепления между атомами металлов сопряженных поверхностей и возникновения адгезии на ограниченных участках (рис. 4) [18, 19].

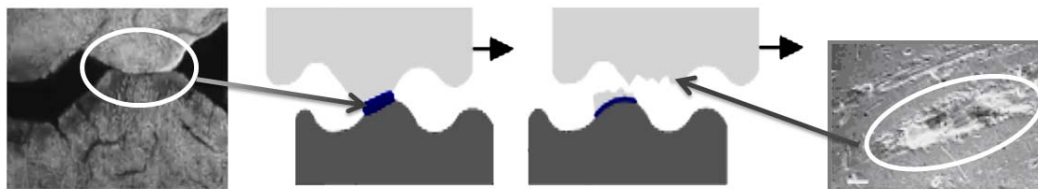


Рис. 4. Адгезионное изнашивание

В результате пластической деформации металла двух поверхностей происходит их сцепление, однако в условиях действия напряжений сдвига это сцепление неизбежно разрушается (рис. 6). Разрушение зарождается в местах наличия наименьших сил сцепления – на границе раздела между двумя поверхностями, а в случае возникновения достаточно прочного сцепления – схватывания, разрушение сдвигом происходит внутри одного из материалов на менее прочном участке (рис. 4).

Многочисленное повторение описанного процесса возникновения адгезии и последующего разрушения узлов схватывания, сопровождающееся задирием и истиранием менее твердого металла, обуславливает **адгезионное изнашивание** [20]. Часть металла низкой твердости, остающегося после среза на сопряженной поверхности металла высокой твердости, нарастает на этой поверхности, а затем, превращаясь в порошок, отделяется от неё. Механическое упрочнение этого порошка становится причиной абразивного изнашивания.

Эрозионное изнашивание – изнашивание, вызванное воздействием на поверхность потока жидкости или газа, содержащего абразивные частицы (рис. 5) [21].

Факторы, влияющие на эрозионное изнашивание:

Абразив: форма частиц; размер частиц; твердость частиц; скорость частиц; масса частиц.

Материал поверхности взаимодействия: твердость; прочность; микроструктура; теплоустойчивость; коррозиоустойчивость.

Внешняя среда: температура; влажность.

Усталостное изнашивание является следствием циклического воздействия на микровыступы трущихся поверхностей. Циклически изменяющиеся контактные напряжения вызывают поверхностное разрушение в виде трещин, выкрашивания и отслаивания.

Незначительные трещины зарождаются в области максимальных касательных напряжений на некоторой глубине под поверхностью и распространяются к поверхности. Трещины могут зарождаться также на поверхности и распространяться вглубь материала.

Выкрашивание характеризуется образованием ямок на поверхности трения в результате отделения частиц материала при усталостном изнашивании.

Усталостное изнашивание возникает от действия:

- нормальной циклической нагрузки (рис. 6, а) [18];
- тангенциальной циклической нагрузки (рис. 6, б).

Окислительно-коррозионное изнашивание (трибохимическое) является следствием повышенной температуры, возникающей в результате трения. Термические процессы износа непосредственно связаны с повышением температуры, вызванной фрикционным нагревом в контакте. С повышением температуры взаимодействие металла с кислородом возрастает. Это явление способствует увеличению окисной плёнки, которая в некоторых случаях уменьшает износ, тогда как в некоторых – увеличивает. Если плёнки прочные, плотные и хорошо связаны с металлом, то они защищают металл от дальнейшего разрушения, например, у химических элементов Zn, Al, Cr, Ni, Sn, Pb и др. Если плёнка рыхлая, как у Fe, то она не защищает металл

от дальнейшего разрушения. Износостойкость оксидов существенно ниже износостойкости основного металла. При разрушении окисной пленки увеличивается шероховатость, повышается абразивное изнашивание. После разрушения окисной пленки металлы оголяются и опять окисляются (рис. 7). В результате общий износ поверхностей деталей интенсифицируется. Термические напряжения могут вызвать тепловую усталость и растрескивание, которые приводят к износу поверхностей [22].

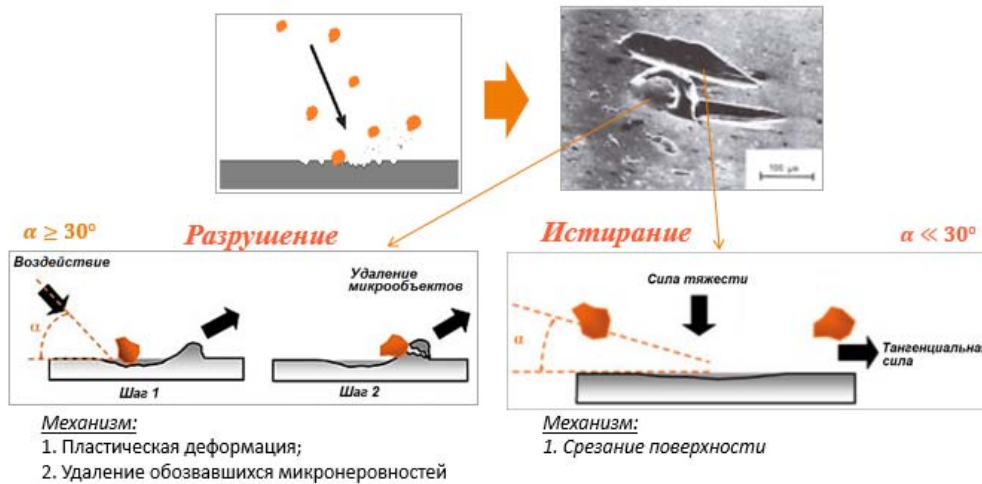


Рис. 5. Эрозионное изнашивание

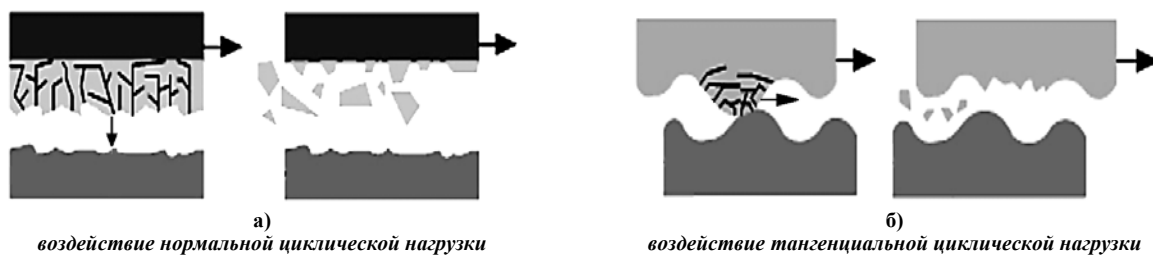


Рис. 6. Усталостное изнашивание

Трибохимическое изнашивание зависит от: скорости относительного перемещения; нагрузки, динамичности её приложения; температуры, генерируемой в контакте; влажности окружающей среды.



Рис. 7. Трибохимическое изнашивание

Из анализа видов изнашивания следует, что температура в контакте колеса и рельса оказывает существенное влияние на износ их рабочих поверхностей. В разных условиях эксплуатации для достижения эффективного взаимодействия системы «колесо-рельс» желательна соответствующая температура. Поэтому путем управления температурой в контакте колеса с рельсом возможно достичь стабильной работы системы «колесо-рельс».

Способ повышения эффективности взаимодействия колеса с рельсом (заявки на изобретение «Способ улучшения условий взаимодействия колесной пары с рельсовым путем»).

Предлагается способ и устройство для улучшения условий взаимодействия колесной пары тягового подвижного состава с рельсовой колеёй. При трогании локомотива с места для повышения сцепления (точка А, рис. 7), при необходимости, в контакт колеса с рельсом подается абразивный материал (точка Б, рис. 8). Далее в контакт колеса с рельсом подается под давлением воздух повышенной температуры (точка В, рис. 8). Нагрев контакта колеса с рельсом способствует очистке поверхностных загрязнений и их отнесу из зоны контакта абразивными частицами. В результате повышения температуры в контакте растет коэффициент сцепления (точка Г, рис. 8), что обеспечивает высокие сцепные качества локомотива и предотвращает возникновение боксования колесной пары (точка Д, рис. 8).

При торможении в контакте колеса с колодкой повышается температура (рис. 9), что при достижении критической температуры $T_{крит}$ приводит к уменьшению коэффициента сцепления и возможности возникновения юза. Для предупреждения юза в контакт колеса с колодкой подается под

давлением охлажденный воздух, чем достигается поддержка максимальной величины коэффициента сцепления.

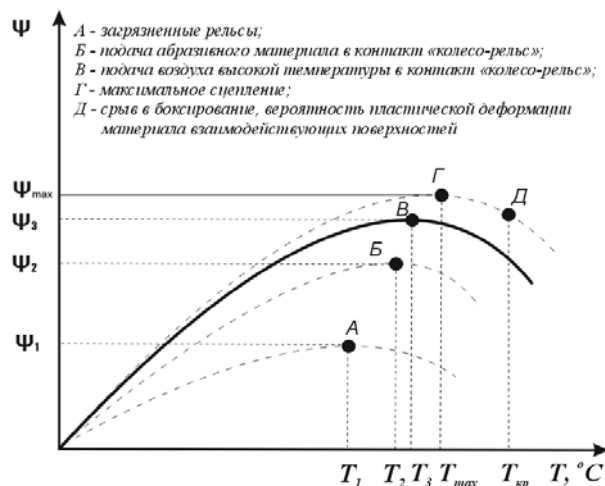


Рис. 8. Зависимость коэффициента сцепления Ψ от температуры T

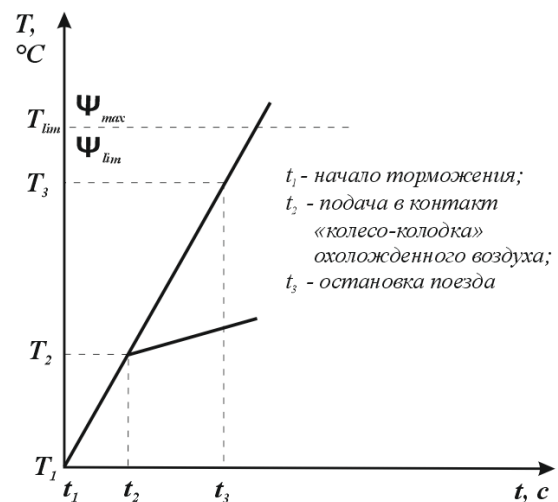


Рис. 9. Зависимость температуры T в контакте «колесо-колодка» от времени торможения t

На загрязненных участках пути в контакт колеса с рельсом подается под давлением воздух высокой температуры, чем обеспечивается испарение поверхностных загрязнений и реализация максимальных значений коэффициента сцепления. Управление процессом подачи воздуха производится из кабины машиниста. В системе подачи воздуха используется эффект Ранка [23].

Вывод

Применение предлагаемого способа улучшения условий взаимодействия колесной пары с рельсами позволит стабилизировать величину коэффициента сцепления при различных режимах движения локомотива в различных эксплуатационных режимах и будет способствовать работе локомотива на максимальной сцепной характеристике без срыва в боксование.

Литература

- Сапронова С.Ю. Наукові основи формоутворення та оптимізація ремонтних профілів коліс локомотивів протягом експлуатаційного життєвого циклу : автореф. дис. на здобуття ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.22.07 «Рухомий склад залізниць та тяга поїздів» / Сапронова С.Ю. – Луганськ, 2012. – 40 с.
- Тепляков А. Н. Пути снижения интенсивности износа гребней колесных пар локомотивов : автореф. на здобуття наук. ступеня дис. канд. техн. наук : спец. 05.22.07 «Рухомий склад залізниць та тяга поїздів» / А.Н. Тепляков. – Хабаровск, 2004. – 18 с.
- Буйносов А.П. Методы повышения ресурса бандажей колесных пар тягового подвижного состава : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук : спец. 05.22.07 «Подвижной состав и тяга поездов» / А.П. Буйносов. – Екатеринбург, 2011. – 44 с.
- Попов С.В. Зниження рівня силової взаємодії гребенів коліс з рейками удосконалюванням пружних зв'язків екіпажа : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.07 «Рухомий склад залізниць та тяга поїздів» / С.В. Попов. — Луганськ, 2008. — 20 с.
- Olofsson U., Lewis R. Tribology of the Wheel – Rail Contact. Handbook of Railway Vehicle Dynamics, 2006 – P. 121 – 141. URL: http://sci-lib.org/books_1/i/iwnicki_01_05.pdf.
- Enblom R. On Simulation of Uniform Wear and Profile Evolution in the Wheel – Rail Contact. Doctoral Thesis in Railway Technology. Department of Aeronautical and Vehicle Engineering. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2006. 112 p. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:11125/FULLTEXT01.pdf>.
- Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. – М. : Наука, 2001. – 478 с.
- Шепеленко И.В. Образование антифрикционного покрытия финишной антифрикционной безабразивной вибрационной обработкой / И.В. Шепеленко, В.В. Черкун // Вібрації в техніці та технологіях. – 2013. – № 3(71). – С. 99–104.
- Дёмкин Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н.Б. Дёмкин. – М. : Наука, 1970. – 227 с.
- Грязев В.М. Выбор метода определения фактической площади контакта поверхностей взаимодействующих деталей / В.М. Грязев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 10. – С. 26–32.
- Трибомеханика. Триботехника. Триботехнологии / [Чернец М.В., Клименко Л.П., Пашечко М.И., Невчас А.] : в 3 т. Т. 1. Механика трибоконтактного взаимодействия при скольжении. – Николаев : Изд-во НГГУ им. Петра Могилы, 2006. – 476 с.
- ГОСТ 27764-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – [Введ. 1989-01-01]. – М. : Издательство стандартов, 1992. – 21 с.

13. Garvey R. Wear Rates Impact Maintenance Priorities. Machinery Lubrication. 2003. № 3. URL: <http://www.machinerylubrication.com/Read/468/wear-rate-maintenance>.
14. Oldknow K. WheelRail Interaction Fundamentals. L.B. Foster Rail Technologies. Principles course. 2014. 68 p. URL: <http://www.wheel-rail-seminars.com/pc-papers/pc-pdfs/Oldknow-Wheel-Rail%20Interaction%20Fundamentals%20WRI%202014.pdf>.
15. Gutierrez-Miravete E. Wear. Topics in Mechanical Engineering: FRICTION, WEAR AND LUBRICATION OF MATERIALS. 2012. 13 p. URL: <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/F2012/FWM/Notes/ch06.pdf>
16. Mechanisms of wear. URL: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear.
17. Тюрин С. В. Ускоренная оценка долговечности тормозных накладок на основе выбора режимов подконтрольной эксплуатации автотранспортных средств : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта» / С.В. Тюрин. – Волгоград, 2014. – 210 с. – 22 с.
18. Scot R. Basic Wear Modes in Lubricated Systems. Machinery Lubrication. 2008. URL: <http://www.machinerylubrication.com/Read/1375/wear-modes-lubricated>.
19. Scott R. Basic Wear Modes in Lubricated Systems. Machinery Lubrication. 2008. URL: <http://www.machinerylubrication.com/Read/1375/wear-modes-lubricated>. –
20. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки ; [пер. с яп. В.Н. Попова ; под. ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина]. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.
21. Introduction to abrasion phenomenon. URL: <http://www.creusabro.com/concept/introduction.aspx>.
22. Olofsson, U., Zhu Y., Abbasi S., Lewis R., Lewis S. Tribology of the wheel-rail contact – aspects of wear, particle emission and adhesion. Vehicle System Dynamics; Special Issue: State of Art Papers. 2013. URL: http://www.academia.edu/3391075/Tribology_of_the_wheel_rail_contact_aspects_of_wear_particle_emission_and_adhesion.
23. Мартынов А.В. Что такое вихревая труба? / А.В. Мартынов, В.М. Бродянский. – М. : Энергия. – 152 с.

References

1. Saprionova S.Yu. NaukovI osnovi formoutvorenniya ta optimizatsiya remontnih profiliv kolls lokomotiviv protyagom ekspluatatsynogo zhittEvogo tsiklu : avtoref. dis. na zdobuttya stupenya d-ra tehn. nauk : 05.22.07 «Ruhomiy sklad zallznits ta tyaga poYizdlv» / Saprionova S.Yu. – Lugansk, 2012. – 40 s.
2. Tepliyakov A. N. Puti snizheniya intensivnosti iznosa grebney kolesnyih par lokomotivov : avtoref. na zdobuttya stupenya dis. kand. tehn. nauk : 05.22.07 «Ruhomiy sklad zallznits ta tyaga poYizdlv»/ A.N. Tepliyakov. – Habarovsk, 2004. – 18 s.
3. Buynosov A.P. Metodyi povyisheniya resursa bandazhey kolesnyih par tyagovogo podvizhnogo sostava : avtoref. dis. na zdobuttya stupenya d-ra. tehn. nauk : 05.22.07 «Podvizhnoy sostav i tyaga poezdov»/ A.P. Buynosov – Ekaterinburg, 201. – 44 s.
4. Popov S.V. Znizhennya rlvnya silovoYi vzaEmodiyi grebeniv kolls z reykami udoskonalyuvannyam pruzhnyh zv'yazklyv ekI pazha : avtoref. dis. na zdobuttya nauk, stupenya kand. tehn. nauk: 05.22.07 «Ruhomiy sklad zallznits ta tyaga poYizdlv» / S.V. Popov. — Lugansk, 2008. — 20 s.
5. Olofsson U. Tribology of the Wheel –Rail Contact [Elektronnyy resurs] / U. Olofsson, R. Lewis // Handbook of RailwayVehicle Dynamics, 2006 – С. 121 – 141. Rezhim dostupa: http://sci-lib.org/books_1/I/iwnicki_01_05.pdf.
6. Enblom R. On Simulation of Uniform Wear and Profile Evolution in the Wheel – Rail Contact [Elektronnyy resurs] / R. Enblom // Doctoral Thesis in Railway Technology. Department of Aeronautical and Vehicle Engineering. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2006/ - 112 p. – Rezhim dostupa : <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:11125/FULLTEXT01.pdf>.
7. Goryacheva I.G. Mehanika friktsionnogo vzaimodeystviya / I.G. Goryacheva. – М.: Nauka, 2001. – 478 s.
8. Shepelenko I.V. Obrazovanie antifriktsionnogo pokryitiya finishnoy antifriktsionnoy bezabrazivnoy vibratsionnoy obrabotkoy / I.V. Shepelenko, V.V. Cherkun // Vibratsiyi v tehnIstl ta tehnologiyah – 2013. – 3(71). – S. 99-104.
9. DYomkin N.B. Kontaktirovanie sherohovatyih poverhnostey / N.B. DYomkin. М.: Nauka, 1970. – 227 s.
10. Gryazev V.M. Vyibor metoda opredeleniya fakticheskoy ploshchadi kontakta poverhnostey vzaimodeystviyuschih detaley. Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki, 2013. Vyip. 10. S. 26-32.
11. Tribomehanika. Tribotekhnika. Tribotekhnologii: / Chernets M.V., Klimenko L.P., Pashechko M.I., Nevchas A./ V 3 t. T. 1. Mehanika tribokontaktного vzaimodeystviya pri skolzhenii – Nikolaev: Izd-vo NGGU im. Petra Mogilyi, 2006. – 476 s.
12. GOST 27764-88. Trenie, iznashivanie i smazka. Terminy i opredeleniya. – Vved. 1989-01-01. – М.: Izdatelstvo standartov, 1992. – 21 s.
13. Garvey R. Wear Rates Impact Maintenance Priorities / R. Garvey // Machinery Lubrication. – 2003. - #3 – Rezhim dostupa: <http://www.machinerylubrication.com/Read/468/wear-rate-maintenance>.
14. Oldknow K. WheelRail Interaction Fundamentals / K. Oldknow // L.B. Foster Rail Technologies. Principles course. 2014. 68 p. – Rezhim dostupa : <http://www.wheel-rail-seminars.com/pc-papers/pc-pdfs/Oldknow-Wheel-Rail Interaction Fundamentals WRI 2014.pdf>.
15. Gutierrez-Miravete, E. Wear / E. Gutierrez-Miravete // Topics in Mechanical Engineering: FRICTION, WEAR AND LUBRICATION OF MATERIALS. – 2012. 13 p.- Rezhim dostupa: <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/F2012/FWM/Notes/ch06.pdf>
16. Mechanisms of wear. Rezhim dostupa: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear.
17. Tyurin, S. V. Uskorennyaya otsenka dolgovечnosti tormoznyih nakladok na osnove vyibora rezhimov podkontrolnoy ekspluatatsii avtotransportnyh sredstv: dis. na soiskanie stepeni k-ta tehn. nauk : 05.22.10 «Ekspluatatsiya avtomobilnogo transporta» / S.V. Tyurin – Volgograd., 2014. – 210 s. – Bibliogr.: с. 22.
18. Scot, R. Basic Wear Modes in Lubricated Systems [Elektronnyy resurs] / R. Scott // Machinery Lubrication. – 2008 – Rezhim dostupa: <http://www.machinerylubrication.com/Read/1375/wear-modes-lubricated>.
19. Scott R. Basic Wear Modes in Lubricated Systems [Elektronnyy resurs] / R. Scott // Machinery Lubrication. – 2008 – Rezhim dostupa: <http://www.machinerylubrication.com/Read/1375/wear-modes-lubricated>. –
20. Hasui, A. Naplavka i napylenie / A. Hasui, O. Morigaki. – Per. s yap. V.N. Popova; pod. red. V.S. Stepina, N.G. Shesterkina. – М.: Mashinostroenie, 1985. – 240 s.
21. Introduction to abrasion phenomenon [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.creusabro.com/concept/introduction.aspx>.
22. Ulf Olofsson, U., Tribology of the wheel-rail contact – aspects of wear, particle emission and adhesion [Elektronnyy resurs] / U. Olofsson, Y. Zhu, S. Abbasi, R. Lewis, S. Lewis // Vehicle System Dynamics; Special Issue: State of Art Papers. – 2013. Rezhim dostupa: http://www.academia.edu/3391075/Tribology_of_the_wheel_rail_contact_aspects_of_wear_particle_emission_and_adhesion.
23. Martynov, A.V. Chto takoe vihrevaya truba? / A.V. Martynov, V.M. Brodyanskiy. – М.:»Energiya». – 152 s.

Рецензія/Peer review : 11.11.2014 р.

Надрукована/Printed :29.11.2014 р.

Рецензент: д.т.н. проф. Н.И. Горбунов