

Вестник

**Научно-исследовательского института
железнодорожного транспорта**
Научно-технический журнал
Периодичность: 6 номеров в год
Издаётся с января 1942 г.
ISSN 2223 – 9731, индекс 70116

Международный редакционный совет

В. В. Степов (председатель, канд. экон. наук,
АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),
В. Е. Фортов (д-р физ.-мат. наук, проф.,
академик РАН, Москва, Россия),
Б. М. Лапидус (д-р экон. наук, проф.,
ОАО «РЖД», Москва, Россия),
К. Эсвельд (проф. железнодорожной
инженерии, Технологический университет
Делфта, Зальтбommel, Нидерланды),
И. Г. Горячева (д-р физ.-мат. наук, проф.,
академик РАН, Институт проблем механики
им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия),
С. Куммер (д-р экономики, проф., Венский
экономический университет, Институт
транспорта и логистики, Вена, Австрия),
Н. А. Махутов (д-р техн. наук, проф.,
член-корреспондент РАН, Институт
машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН,
Москва, Россия),
В. И. Колесников (д-р техн. наук, проф.,
академик РАН, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия),
В. Ф. Ушкалов (д-р техн. наук, член-
корреспондент НАН, Институт технической
механики НАН, Днепр, Украина),
К. П. Шенфельд (д-р техн. наук, АО «ВНИИЖТ»,
Москва, Россия),
Г. С. Фокс-Рабинович (д-р техн. наук,
Университет Макмастера, Гамильтон, Канада),
Б. А. Лёвин (д-р техн. наук, проф., МИИТ,
Москва, Россия),
В. И. Сенько (д-р техн. наук, проф.,
Белорусский государственный университет
транспорта, Гомель, Республика Беларусь),
А. С. Назаров (канд. техн. наук, ОАО «РЖД»,
Москва, Россия),
Д. А. Мачерет (д-р экон. наук, проф.,
АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),
Б. Е. Дынькин (д-р техн. наук, проф., РГУПС,
Ростов-на-Дону, Россия),
Е. Н. Розенберг (д-р техн. наук, проф.,
ОАО «НИИАС», Москва, Россия),
А. В. Смольянинов (д-р техн. наук, проф.,
УрГУПС, Екатеринбург, Россия),
Ли Сюэвей (д-р наук, проф., Пекин,
Китайская Народная Республика)

Редакционная коллегия

А. Б. Косарев (председатель, д-р техн.
наук, проф.),
С. В. Фёдоров (д-р техн. наук, проф.),
М. М. Железнов (канд. техн. наук, доцент),
Ж. Е. Бедова (секретарь),
С. М. Захаров (д-р техн. наук, проф.),
Н. Ф. Сирина (д-р техн. наук, доцент),
Д. В. Ермоленко (д-р техн. наук, доцент),
Г. В. Гогричани (д-р техн. наук),
А. В. Котельников (д-р техн. наук, проф.),
А. Я. Коган (д-р техн. наук, проф.),
В. А. Ивницкий (д-р техн. наук, д-р физ.-мат.
наук, проф.),
В. А. Кучумов (д-р техн. наук, проф.),
Е. А. Макарова (д-р экон. наук),
Л. А. Мугинштейн (д-р техн. наук, проф.),
Е. А. Шур (д-р техн. наук, проф.),
Б. Э. Глюзберг (д-р техн. наук, проф.),
О. Ф. Мирошниченко (д-р экон. наук, проф.)

Учредитель — АО «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта».

Журнал включен в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ). Статьи
рецензируются.

© «Вестник научно-исследовательского
института железнодорожного транспорта»
(«Вестник ВНИИЖТ»), Москва, 2017

Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Вестник ВНИИЖТ | Том 76, 3/2017
DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3>

СОДЕРЖАНИЕ

Анализ состояния производства и качества изготовления бронзо-бabbitовых подшипников коленчатого вала тепловозных дизелей	
А. Е. Миронов, С. М. Захаров, Г. С. Фокс-Рабинович, М. М. Железнов	131–137
Оценка интенсивности бокового и вертикального износов рельсов под проходящими поездами	
А. Я. Коган	138–145
Технологический процесс работы центра управления перевозками восточного полигона (ЦУП ВП)	
В. Л. Зобнин, А. Т. Осьминин, Е. А. Сотников, М. А. Осьминин	146–152
Стояночные тормозные башмаки. Эксплуатационные испытания	
Д. П. Марков, И. Н. Воронин, Н. П. Шипулин, В. И. Маршев, А. В. Сухов, В. В. Гузанов, А. В. Куминов	153–158
Визуализация изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог	
А. Н. Киреев	159–164
Определение возможности увеличения межремонтных нормативов вагонов-хопперов (цементовозов)	
С. В. Петров, Г. В. Райков, А. В. Васильев, С. Е. Гончаров, А. Н. Кемеж	165–173
Перспективность применения металлоуглеродных контактных вставок для токосъема на железных дорогах России	
В. Я. Берент	174–180
Влияние новой конструкции щеткодержателей на эксплуатационный ресурс щеток тяговых электродвигателей электровозов	
Д. Н. Хомченко	181–186
Моделирование вибродемпфирующих свойств упруговязкопластических слоев земляного полотна. Постановка задачи 1	
В. М. Бельков	187–192

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-35600 от 17.03.2009.
Мнение редакции может не совпадать
с мнением авторов статей.
Редакция не несет ответственности
за содержание рекламных материалов.
Адрес учредителя, издателя, редакции
журнала «Вестник ВНИИЖТ»:
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10.
Тел. (499) 260-43-19.
Цена свободная.

Главный редактор — Ж. Е. Бедова.
Подписано к печати 27.06.2017.
Дата выхода в свет 07.07.2017.
Формат бумаги 60×90 1/8.
Офсетная печать. Усл. печ. л. 8.
Тираж 600 экз. Заказ 000.
Верстка — ООО «ИПП «КУНА».
Отпечатано в ООО «Типография Парадиз»,
143090, Московская обл.,
г. Краснознаменск, ул. Парковая, д. 2а.
Тел. (495) 775-24-10.

Vestnik VNIIZhT

Vestnik of the Railway Research Institute
Vol. 76, 3/2017

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3>

Contents

Analysis of the state of production and manufacturing quality of bronze-babbit bearings of the crankshaft of diesel locomotives

by A. E. Mironov, S. M. Zakharov, G. S. Foks-Rabinovich, M. M. Zhelezov 131–137

Evaluation of the intensity of lateral and vertical wear of rails under passing trains

by A. Ya. Kogan 138–145

Technological work process of the control center for transportation of the eastern operational polygon (TsUP VP)

by V. L. Zobnin, A. T. Os'minin, E. A. Sotnikov, M. A. Os'minin 146–152

Parking brake shoes. Operational tests

by D. P. Markov, I. N. Voronin, N. P. Shipulin, V. I. Marshev, A. V. Sukhov, V. V. Guzanov, A. V. Kuminov 153–158

Visualization of defects images during manual ultrasonic inspection of parts and units of the railway rolling stock

by A. N. Kireev 159–164

Determination of the possibility of increasing the between-repair standards of hopper cars (cement carriers)

by S. V. Petrov, G. V. Raykov, A. V. Vasil'ev, S. E. Goncharov, A. N. Kemez 165–173

Prospectivity of application of metal-carbon contact strips for current collection on Russian railways

by V. Ya. Berent 174–180

Influence of a new design of brush holders on the service life of traction electric motor brushes of electric locomotives

by D. N. Khomchenko 181–186

Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 1

by V. M. Bel'kov 187–192

Editorial Board:

Alexander B. Kosarev
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Sergey V. Fedorov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Maksim M. Zhelezov
(Cand. Sci. (Eng.)),
Sergey M. Zakharov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Nina F. Sirina
(Dr. Sci. (Eng.), Associate Prof.),
Dmitriy V. Ermolenko
(Dr. Sci. (Eng.), Associate Prof.),

Georgy V. Gogrichiani
(Dr. Sci. (Eng.)),
Alexander V. Kotelnikov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Alexander Ya. Kogan
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Victor A. Ivitsky
(Dr. Sci. (Eng.), Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof.),
Vladislav A. Kuchumov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),

Elena A. Makarova
(Dr. Sci. (Econ.)),
Lev A. Muginshtein
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Evgeniy A. Shur
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Boris E. Glyuzberg
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Olga F. Miroshnichenko
(Dr. Sci. (Econ.), Prof.)

Editor-in-Chief: Joan E. Bedova

E-mail: journal@vniizht.ru
Layout & Design: OOO "IPP "KUNA".
Passed for printing 27.06.2017
Format 60×90 1/8. Circulation 600 copies

Editorial office: 10, 3rd Mytischinskaya,
129626 Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 260 4319
Print: "Printing-office Paradiz LTD".
info@paradiz.ru

Vestnik VNIIZhT
is published six times per year
First published in 1942
ISSN 2223 – 9731

A peer reviewed scientific and technological journal

Publisher:

JSC Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"),
Moscow, Russian Federation
www.vniizht.ru

International Advisory Board:

Victor V. Stepov,

Cand. Sci. (Econ.), General Director of JSC "VNIIZhT",
Master's degree in business administration (MBA)
in Stockholm School of Economics, Moscow,
Russian Federation

Vladimir E. Fortov,

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician of the
Russian Academy of Sciences (RAS), Director of United High
Temperature Institute of RAS, Moscow, Russian Federation

Boris M. Lapidus,

Dr. Sci. (Econ.), Professor, Chairman of Joint Scientific
Council RZD, Chairman of International Board on Railway
Research (IRRB) of UIC, Guest professor of Stockholm
School of Economics, Moscow, Russian Federation

Coenraad Esveld,

Prof., Dr. of railway engineering of Delft Technical
University, General Director of "Esveld Consulting
Services", Zaltbommel, Netherlands

Irina G. Goryacheva,

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician of
the RAS, Head of laboratory for tribology, Institute for
Problems in Mechanics of the RAS, Moscow, Russian
Federation

Sebastian Kummer,

Univ. Prof. Dr. (Econ.) of Vienna University of Economics
and Business, Head of Institute of Transport and Logistics,
Vienna, Austria

Nikolay A. Makhutov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member of the
RAS, Head of the scientific school "Safety and security
of critically and strategically important objects of
infrastructure" of Research Institute for Machine Science
named after A. A. Blagonravov of the RAS (IMASH RAS),
Moscow, Russian Federation

Vladimir I. Kolesnikov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian
Academy of Sciences, Rostov state university of railway
engineers (RGUPS), Rostov-on-Don, Russian Federation

Victor F. Ushkalov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, corresponding member of the
National Academy of Science of Ukraine, division head of
Statistics for kinetics of material system of the Institute of
Technical Mechanics, Dnepr, Ukraine

Konstantin P. Shenfeld,

Dr. Sci. (Eng.), Executive director of JSC "VNIIZhT",
Moscow, Russian Federation

Herman S. Fox-Rabinovich,

Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher of McMaster University
Engineering, Hamilton, Ontario, Canada

Boris A. Levin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, rector of the Moscow State
University of Railway Engineering (MIIT),
Moscow, Russian Federation

Li Xuewei,

Dr. Sci., Professor, Vice-President of Engineering Union
of China Transport system, Party Member of CPC group
of Ministry of Education (Peking University, China)

Benjamin I. Senco,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, rector of the Belorussian State
University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Alexander S. Nazarov,

Cand. Sci. (Eng.), Head of technical policy department
JSC RZD, Moscow, Russian Federation

Dmitriy A. Macheret,

Dr. Sci. (Econ.), Professor, JSC "VNIIZhT", Joint Research
Council of JSC RZD, Moscow, Russian Federation

Boris E. Dynkin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored President of
International association of transport universities of
Asian-Pacific countries (IATU APC), Rostov state university
of railway engineers (RGUPS), Rostov-on-Don, Russian
Federation

Efim N. Rozenberg,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, First deputy Director General
of JSC Design & Research Institute for Information
Technology, Signaling and Telecommunication on Railway
Transport (JSC NIAC), Moscow, Russian Federation

Alexander V. Smolyaninov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of department "Wagons" of Ural
State University of Railway Transport, Yekaterinburg,
Russian Federation

© JSC Railway Research Institute, Moscow 2017

Анализ состояния производства и качества изготовления бронзо-баббитовых подшипников коленчатого вала тепловозных дизелей

А. Е. МИРОНОВ¹, С. М. ЗАХАРОВ¹, Г. С. ФОКС-РАБИНОВИЧ², М. М. ЖЕЛЕЗНОВ¹

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Университет Макмастера, Гамильтон, 1280, Канада

Аннотация. Рассмотрены области применения бронзо-баббитовых подшипников для тепловозных дизелей. Описаны основные типы повреждений (усталостное и коррозионно-кавитационное изнашивание) и факторы на них влияющие. Приведены результаты исследований по технологическим факторам, оказывающим влияние на усталостные повреждения. Описаны нарушения, которые имеют место при изготовлении подшипников различными производителями. Изложены результаты анализа влияния химического состава баббита на его структуру. Сделаны выводы по проведенным исследованиям и даны предложения, направленные на проверку качества бронзо-баббитовых подшипников, изготавливаемых различными производителями.

Ключевые слова: баббит; подшипники; химический состав; приспособляемость; вторичные структуры

Области применения бронзо-баббитовых подшипников. Бронзо-баббитовые вкладыши подшипников многие десятилетия применялись на дизелях 2Д100 и 10Д100 магистральных тепловозов ТЭЗ и ТЭ10 различных модификаций. Однако к настоящему времени большинство из дизелей выработали ресурс, и на многих тепловозах силовые агрегаты заменены или планируется их заменить на дизели с другой конструкцией подшипников коленчатого вала.

Помимо магистральных тепловозов, было выпущено довольно большое количество дизелей, на которых применялись бронзо-баббитовые подшипники коленчатого вала, например, для маневровых тепловозов ТЭМ2 и ЧМЭЗ. На тепловозах ТЭМ2 устанавливался дизель ПД1М мощностью 1200 л.с. (882 кВт), а на чешских тепловозах ЧМЭЗ — дизель K6S310DR мощностью 1350 л.с. (993 кВт). Было произведено 7870 тепловозов ТЭМ2 и 7459 — ЧМЭЗ.

Большое распространение к настоящему времени бронзо-баббитовые вкладыши подшипников имеют на дизелях ПДГ4Д (6ЧН31, 8/33) и ряда его модификаций, устанавливаемых на тепловозах ТЭМ18, ТЭМ18В и ТЭМ18ДМ Брянского машиностроительного завода, входящего в ЗАО «Трансмашхолдинг». К 2014 г. изготовлено более 1400 тепловозов с этими дизелями.

Различные модификации этих тепловозов продолжают изготавливаться и в настоящее время. Тепловозы ТЭМ18 и его модификации широко применяются на сети железных дорог и на промышленном транспорте. Дизель ПДГ4Д мощностью 882 кВт, устанавливаемый в разных модификациях на эти тепловозы, производится ОАО «Пензадизельмаш». Дизель имеет стальной коленчатый вал, который уложен на тонкостенные подшипники, имеющие бронзовый корпус с заливкой антифрикционного слоя на основе баббита БК2.

В 1951 г. после обстоятельных исследований коллектива ученых под руководством Н.А. Буше [1] был создан антифрикционный сплав БК2 вместо Б83, что позволило получать тонкослойные подшипники, в которых антифрикционный слой не имел крупных твердых интерметаллидных включений.

Бронзо-баббитовые подшипники обладают рядом преимуществ перед другими типами подшипников. Бронзовый корпус обеспечивает хороший отвод тепла из зоны трения, а тонкий слой баббита (толщиной 0,5–0,7 мм) обеспечивает хорошие антифрикционные свойства, прирабатываемость, приспособляемость, способность антифрикционного слоя воспринимать кратковременные нарушения гидродинамического режима смазки без схватывания и существенного повышения температуры и приемлемые усталостные свойства для условий нагружения, в которых подшипники предназначены работать.

Основные виды повреждений бронзо-баббитовых подшипников. В работах [1, 2] были установлены основные виды повреждений и даны причины выхода их из строя. В табл. 1 приведено распределение причин повреждений (в процентах) шатунных и коренных бронзо-баббитовых подшипников на дизелях 2Д100 [2].

Из этих данных видно, что усталостные повреждения антифрикционного слоя являются основной причиной повреждений бронзо-баббитовых вкладышей подшипников. Для сравнения приведено распределение причин повреждения вкладышей подшипников из сталь-свинцовистой бронзы дизелей М756. Они дают общее представление о преоблада-

ющих видах повреждений бронзо-баббитовых подшипников: низкая усталостная прочность баббита, вспучивания и кавитационно-эрозионные повреждения.

Вкладыши подшипников из свинцовистой бронзы не имели усталостных повреждений, зато были выходы их из строя по задиру и по коррозионному изнашиванию. На рис. 1 приведен характерный вид усталостного повреждения баббитового слоя БК2 шатунного подшипника тепловозного дизеля. Другим наиболее часто встречающимся повреждением бронзо-баббитовых подшипников является кавитационно-коррозионное изнашивание, которое также было изучено и описано в работах [1, 2, 3].

Ранее [3] отмечалось наличие кавитационных повреждений двух видов. На более мягких антифрикци-

онных сплавах разрушения имеют вид выдавленных кратеров с выпуклыми краями, на более твердых — губчатой сыпи. Этот вид разрушения если имеет место, то на всех вкладышах дизеля и, как было установлено в работах [1, 2, 3], связан с попаданием воды в масло дизеля и обычно ведет к комплексной замене вкладышей. Меры по борьбе с этими повреждениями были направлены на недопущение попадания воды в масло дизеля. Был обнаружен и другой, «местный» вид кавитационных повреждений, связанный с течением смазочного материала, формой и расположением маслоподводящих канавок и отверстий в шейке вала, образованием пузырьков и их «захлопыванием», вызывающим кавитационные повреждения [3]. Меры по борьбе с этим «местным» кавитационным повреждением были связаны с изменением формы и мест расположения смазочных канавок и отверстий.

Некоторые исследователи [4] классифицируют кавитационные повреждения подшипников первого вида (для паровых турбин) как электроэрозионные, при которых каверны образуются в результате отдельных электрических разрядов, воздействующих на баббитовый слой, а «ручьистый» рельеф на баббите объясняется воздействием на него микроэрозионных разрядов. В практике применения подшипников скольжения на железнодорожном транспорте коррозионно-кавитационные дефекты первого типа наблюдались не только на вкладышах подшипников дизелей, но и на моторно-осевых подшипниках локомотивов и на буксовых подшипниках скольжения вагонов, не связанных напрямую с электрическими полями. Как показывали результаты обследований, кавитационно-эрозионные повреждения этих вкладышей подшипников были связаны с изменениями свойств смазочных материалов, в которые попадала вода или другие ингредиенты, повышающие коррозионную активность смазки. Влияние воздействия электрических полей на дизель-генераторах 10Д100 проявлялось в том, что подшипники расположенные ближе к генератору имели большие кавитационно-коррозионные повреждения, что объясняется усилением коррозионной активности под действием электрических полей.

Усталостные повреждения баббита и влияющие на них технологические факторы. Многолетний опыт исследований бронзо-баббитовых подшипников позволил выявить ряд технологических факторов, которые оказывают существенное влияние на их работу, и сформулировать рекомендации для производителей и эксплуатационников [5]. Ниже рассмотрены некоторые из этих факторов и результаты исследований с ними связанные.

Лужение бронзового корпуса припоями проводится для обеспечения надежной адгезии баббита к бронзовому основанию. Исследование переходных слоев между бронзой и баббитом выявило большое количество нарушений в составах использованных припоев. В

Таблица 1

Распределение повреждений вкладышей подшипников тепловозных дизелей по видам

Table 1

Distribution of damages of bearing bushings of locomotive diesel engines by types

Виды повреждений	Тип дизеля			
	Дизель 2Д100		Дизель М756	
	Шатунные	Коренные	Шатунные	Коренные
Усталостное изнашивание	77,0	71,3	—	—
Задир	—	—	41,7	5,3
Коррозионное изнашивание	—	—	38,9	79,3
Кавитационно-эрозионное изнашивание	10,8	8,6	—	—
Потеря натяга	0,1	0,4	1,4	2,6
Повышенный износ	3,8	11,2	—	—
Увеличенный зазор	0,1	3,0	—	4,5
Фреттинг-коррозия	—	—	18,0	2,3
Прочие повреждения	8,2	5,5	—	6,0
Всего	100	100	100	100



Рис. 1. Усталостные повреждения баббитового слоя в шатунном подшипнике дизеля 10Д100

Fig. 1. Fatigue damages of the babbitt layer in the conrod bearing of the diesel engine 10D100

частности, это имеет место при применении припоев, содержащих сурьму (ПОССу). Сурьма взаимодействует с кальцием, содержащимся в баббите, с образованием включений легкой интерметаллидной фазы, которая всплывает в шлак. В результате антифрикционный слой обедняется кальцием, становится мягким (до 8–10 НВ) и подвергается пластическим деформациям («выдавливанию») под действующими нагрузками.

Другим нарушением при лужении является применение припоя с большим (до 61%) содержанием олова. Чем выше содержание олова, тем быстрее и интенсивнее полуда взаимодействует с бронзой. При заливке этот слой полностью или частично размывается струей расплавленного баббита. В результате антифрикционный слой оказывается чрезмерно легирован оловом, медью и цинком, что изменяет комплекс его механических и триботехнических свойств.

Необходимо также оптимизировать время лужения и не допускать захлаживания полуды. Если от момента извлечения бронзового корпуса из ванны лужения проходит слишком большой промежуток времени, то полуда успевает провзаимодействовать с бронзой. При этом создается толстый (более 10 мкм) интерметаллидный слой системы Cu—Sn, который повышает вероятность усталостного выкрашивания из-за своей хрупкости. Кроме того, на захлаженной поверхности полуды осаждаются выделения CaPb_3 как соединения кристаллизующегося в первую очередь. При этом в самом баббите уменьшается концентрация кальция, он становится крупнозернистым, и у баббитового слоя снижается твердость.

Натрий, который кристаллизуется в последнюю очередь, наоборот, отсутствует в зоне лужения, но имеет повышенную концентрацию ближе к рабочей поверхности баббитового слоя. Если захлаженность слоя полуды сочетается с длительным лужением или перезаливкой вкладыша после выплавления старого баббитового слоя без проточки до свежей поверхности бронзы, то на поверхности бронзы возможно образование не только толстого интерметаллидного слоя, но и дендритных интерметаллидных наростов. Исследования распределения элементов в различных областях вкладышей подшипников проводились на электронных микроскопах (СЭМ). На рис. 2 представлено распределение олова в переходном слое, имеющем вид дендритного образования интерметаллида Sn_2Cu , поверх облуженной поверхности бронзы. Дендритные наросты являются сильными концентраторами напряжений, провоцирующими усталостные разрушения баббитового слоя.

Качество чушкового баббита. При составлении шихты для заливки баббита используется не только баббит марки БК2, но и баббит марки БК2Ш, а также переплав отходов производства предыдущих партий подшипников. Помимо этого, ряд заводов и депо

используют при шихтовке другие виды свинцового лома, особенно аккумуляторный свинец и свинцовые оплетки электрических кабелей. Анализ химического состава баббитовых слоев подшипников, получаемых из эксплуатации, показывает наличие примесей железа, кремния, алюминия, хрома, сурьмы. Во многих случаях именно эти загрязнения делают баббит непригодным для эксплуатации.

В настоящее время согласно ГОСТ 1209–90 «Баббиты кальциевые в чушках. Технические условия» в России предусматривается возможность изготовления баббита в чушках четырех марок, их химический состав приведен в табл. 2. Следует подчеркнуть, что эти баббиты являются только материалом, используемым для шихтовки плавок, а химический состав антифрикционного слоя вкладышей имеет отличия.

Еще в 60-х гг. прошлого столетия Н.А. Буше [1] были разработаны требования, которым должны удовлетворять баббиты, используемые для тонкослойных вкладышей подшипников с целью обеспечения надлежащей долговечности. Они не должны иметь резко выраженной неоднородной структуры, обязаны обладать повышенным сопротивлением усталости, твердостью баббитового антифрикционного слоя до 15–23 НВ. Наиболее полно этим требованиям отвечает антифрикционный сплав, получаемый при использовании чушкового баббита БК2. Однако в различных источниках приводится различный химический состав антифрикционного слоя, иногда не учитывающий его изменение в процессе производства (табл. 3).

Так, в [6] не учитывался угар легирующих элементов во время плавки и возможность подшихтовки отходами производства. Помимо этого, твердость баббита составила 32 НВ, что не соответствует сформулированным в [1] требованиям для тонкослойных подшипников.

Требования ТУ 15-ЦТВР действовали до середины 70-х гг, после чего в состав чушкового баббита БК2 и сплава на его основе были введены существенные изменения. Следующие требования ТУ 32-ЦТВР и Технической инструкции по перезаливке подшипников

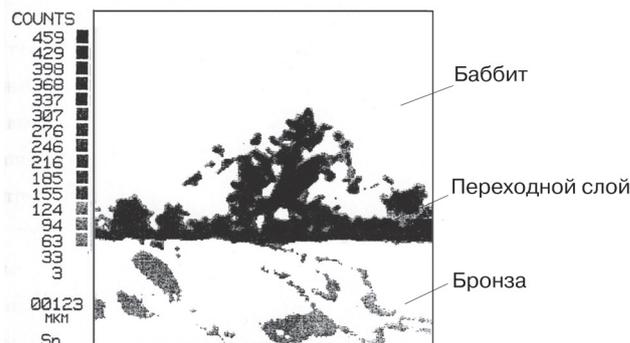


Рис. 2. Распределение олова в переходном слое, имеющем вид дендритного образования (СЭМ, ×1000)
Fig. 2. Distribution of tin in the transition layer, which has the form of a dendritic formation (SEM, ×1000)

Таблица 2

Химический состав чушек кальциевых баббитов, изготавливаемых в России

Table 2

Chemical composition of calcium babbits pigs, manufactured in Russia

Марка баббита	Содержание элементов, % по массе												
	Основные компоненты							Примеси, не более					
	Ca	Na	Mg	Sn	Zn	Al	Pb	Bi	Sb	Cu	Al	Mg	Сумма остальных
БКА	0,95–1,15	0,70–0,90		–	–	0,05–0,20	Остальное	0,10	0,25	–	–	0,02	0,30
БК2	0,30–0,55	0,20–0,40	0,01–0,05	1,50–2,10	–	–	Остальное	0,20	0,20	0,15	0,02	–	0,30
БК2Ш	0,65–0,90	0,70–0,90	0,03–0,09	1,50–2,10	–	–	Остальное	0,20	0,20	0,15	0,02	–	0,30
БК2Ц	0,95–1,15	0,70–0,90	–	1,50–2,10	0,40–0,60	–	Остальное	0,20	0,20	0,15	0,02	0,02	0,30

учитывают угар легирующих элементов при плавке и процессы старения, происходящие в кальциевых баббитах после отливки. В них предусмотрено несколько измерений твердости специально отлитых образцов. В первом, изготовленном не ранее трех часов после отливки, твердость должна быть не ниже 13 НВ. Как показывает опыт, лучшей работоспособностью обладают баббиты с твердостью 18–23 НВ после старения. При более высоких значениях твердости подшипники хуже прирабатываются и сильнее изнашивают шейки коленчатого вала, имеют большую склонность к усталостному выкрашиванию и вспучиванию антифрикционного слоя.

В настоящее время многие производители подшипников скольжения разрабатывают для своей про-

дукции собственные ТУ. Проведенные во ВНИИЖТ исследования показывают, что химические составы и твердость антифрикционного слоя изделий ряда производителей далеки от утвержденных нормативных документов. В ряде случаев толщина антифрикционного слоя превышает 1,0 мм (вместо 0,5–0,7 мм), что отрицательно сказывается на их работоспособности, поскольку с увеличением толщины антифрикционного слоя выше рекомендованного снижается сопротивляемость подшипника усталостным разрушениям.

Слой с мелкозернистой структурой и мелкими включениями в теле зерна (рис. 3) является наиболее работоспособным. Концентрация кальция 0,06–0,15 % соответствует перитектической реакции образования соединений $CaPb_3$ при кристаллизации. Данные выделения являются центрами кристаллизации сплава. В таком концентрационном интервале кальций является для баббита модификатором второго рода. Повышение содержания кальция приведет к увеличению размеров выделений, но не увеличит их количество. Крупные выделения, как отмечалось ранее, снижают работоспособность баббитового слоя. Натрий, в отличие от кальция, кристаллизуется в последнюю очередь, сдерживая рост зерен баббита, и, таким образом, является модификатором первого рода. Соответственно, большая часть натрия сосредотачивается у границ зерен, а меньшая — в твердом растворе в теле зерен.

Магний при кристаллизации входит в твердый раствор со свинцом. При старении магний выделяется из твердого раствора и взаимодействует с оловом, образуя мелкие включения с высокими антифрикционными свойствами. Старение кальциевого баббита выражается в обеднении твердого раствора свинца натрием и магнием с образованием дополнительного количества более твердых, чем свинцовый раствор, выделений. Поэтому количество натрия и магния не-

Таблица 3

Химические составы антифрикционных слоев, полученных при переплаве чушкового баббита БК2

Table 3

Chemical compositions of antifriction layers obtained by remelting pig's babbitt BK2

Источник	Содержание легирующих элементов, % по массе				
	Ca	Na	Mg	Sn	Pb
ТУ 15-ЦТВР	0,23–0,45	0,15–0,30	0,03–0,10	1,50–2,50	Остальное
ТУ 32-ЦТВР	0,06–0,15	0,15–0,30	0,01–0,03	1,50–2,10	Остальное
ТИ «Перезаливка подшипников коленчатого вала дизелей 2Д100 и 10Д100». ПКБ ЦТ 25.00001	0,06–0,16	0,15–0,30	0,01–0,02	1,50–2,10	Остальное
Монография [2]	0,30–0,55	0,20–0,40	0,01–0,06	1,50–2,10	Остальное
Учебник МВТУ [6]	0,30–0,55	0,20–0,40	0,01–0,05	1,50–2,10	Остальное

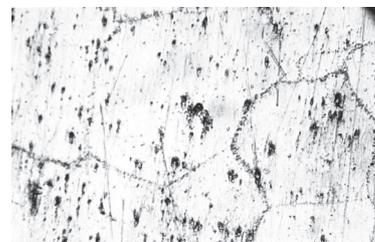
обходимо строго ограничивать, чтобы не получить чрезмерную твердость слоя. Кроме того, натрий и особенно магний имеют высокое сродство к водороду. Поэтому при наличии в атмосфере разливного цеха высокой влажности расплав насыщается водородом, который при заливке подшипников находится в твердом растворе свинца в атомарном состоянии. При старении атомарный водород стремится в литейные несплошности в виде раковин или пор, где превращается в молекулярный водород. Молекулярный водород неспособен растворяться в твердом свинце и происходит его накопление и повышение парциального давления. Когда это давление превышает предел текучести свинцовой матрицы, происходит появление на поверхности баббита вспучиваний. Снижение содержания натрия и магния в баббите позволило значительно снизить появление дефекта вспучивания.

О структурной приспособляемости подшипников с антифрикционным слоем из кальциевых баббитов. Одна из основных задач легирующих элементов в антифрикционных сплавах — способствовать образованию при трении на контактирующих поверхностях вторичных структур, улучшающих характеристики антифрикционного материала [7, 8, 9].

Кальциевые баббиты обладают высокой способностью к образованию подобных структур, что выража-

Рис. 3. Характерная структура металла баббитового слоя (×500)

Fig. 3. The characteristic structure of babbit layer of the metal (×500)



ется в перераспределении щелочных металлов между поверхностями трения и внутренними областями баббитового слоя. Это иллюстрируется на примере подшипника, баббитовый слой которого был загрязнен алюминием и железом. На поверхности трения при контакте с крупной абразивной частицей образовалась глубокая борозда, которая заполнилась металлополимерной композицией на основе натрия, кальция и продуктов разложения смазки. При этом подповерхностный слой обедняется натрием и кальцием (рис. 4). Эти процессы протекают на всей поверхности трения, и их интенсивность напрямую связана с интенсивностью трения, воспринимаемой областями поверхности с различным их состоянием: грубым натиром (рис. 5, а), гладкой и ровной поверхностью (рис. 5, б) и неровной и шероховатой поверхностью (рис. 5, в).

Химический состав поверхности грубого натира (табл. 4) можно охарактеризовать минимальным

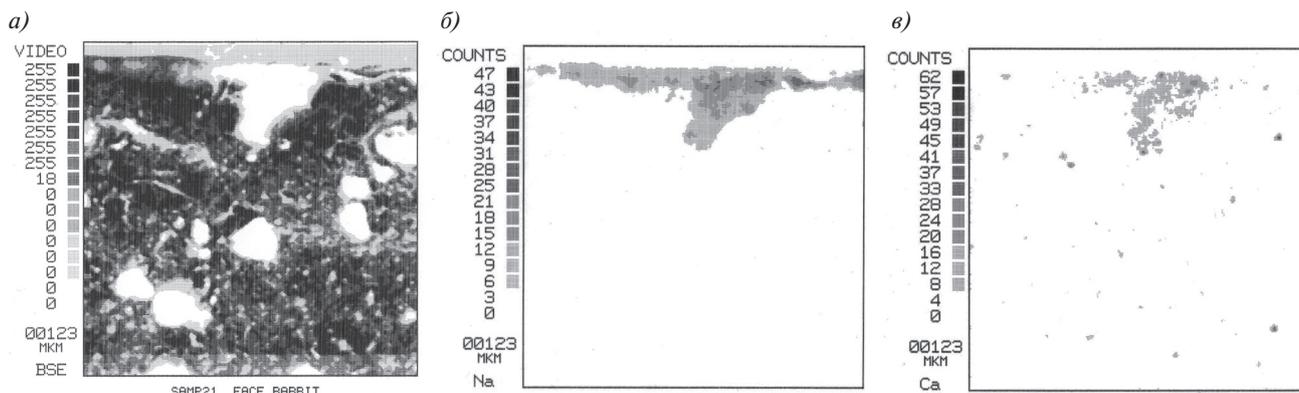


Рис. 4. Область исследования (а) и распределение натрия (б) и кальция (в) в зоне борозды
Fig. 4. The area of research (a) and the distribution of sodium (b) and calcium (c) in the groove zone

Таблица 4

Химический состав вторичных структур исследованных областей баббитового слоя

Table 4

The chemical composition of the secondary structures of the investigated regions of the babbit layer

Объект исследования	Содержание элементов, % по массе										
	C	O	Na	Ca	Mg	Sn	Fe	Al	Zn	Cu	Pb
Грубый натир	2,58	0,34	0,25	0,22	0,08	1,86	3,79	—	—	—	Остальное
Гладкая поверхность	8,23	3,68	0,47	1,01	—	2,34	0,86	0,13	—	4,84	Остальное
Шероховатая поверхность	10,92	3,16	0,39	0,28	0,17	0,87	1,59	—	0,60	1,98	Остальное
Свинцовая матрица в подповерхностном слое	—	—	0,12	0,07	След	2,36	—	0,01	—	0,26	Остальное

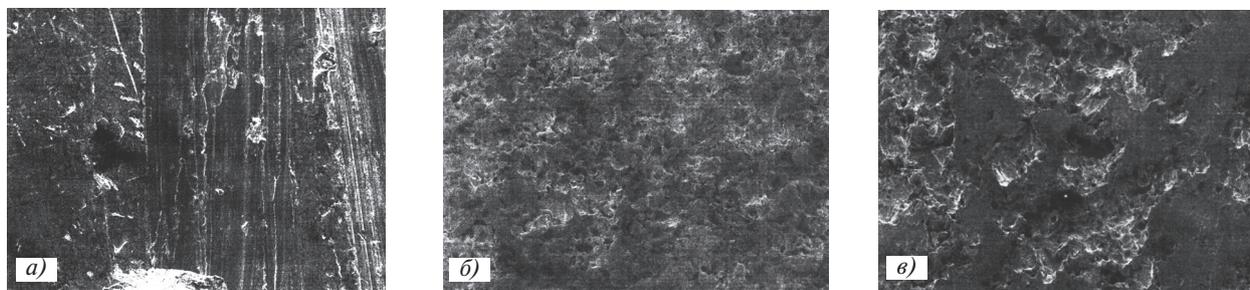


Рис. 5. Поверхности трения баббитового слоя с разным состоянием:
a — поверхность с грубым натиром; *б* — гладкая поверхность; *в* — шероховатая поверхность
 Fig. 5. Friction surfaces of the babbit layer with different states:
a — surface with rough scuff; *б* — smooth surface; *в* — rough surface

содержанием углерода и кислорода при максимальном содержании железа, это свидетельствует о том, что вторичная структура образовалась в последний период работы подшипника, когда взаимодействие со смазкой после воздействия стальной частицы не позволило образоваться металлополимерному слою вторичных структур.

Гладкая поверхность достигается при очень высоких содержаниях натрия, кальция и меди. При этом содержание олова близко к исходному, магний практически отсутствует, а взаимодействие со сталью — минимально. Концентрация углерода, характеризующая степень воздействия смазки, находится на среднем уровне, а содержание кислорода — на максимальном.

Анализ свинцовой матрицы в подповерхностном слое показывает, что она обеднена всеми основными легирующими элементами (Na, Ca, Mg), которые продифундировали на поверхность трения и способствовали образованию выгодных вторичных структур.

При этом не выявлено влияние самоорганизации на усталостную прочность. Проблема повышения усталостной прочности подшипников скольжения решается применением других видов антифрикционных материалов. Перспективы их применения и анализ путей совершенствования материалов и технологий изготовления подшипников коленчатого вала для тепловозных дизелей выполнен в работе [10].

Выводы. 1. Бронзо-баббитовые подшипники коленчатого вала широко использовались и продолжают применяться в дизелях тепловозов при условии их использования в диапазоне рекомендованных нагрузок и изготовления в соответствии с утвержденными нормативами

2. Рассмотрены усталостные повреждения баббитового слоя и технологические факторы, влияющие на их образование при лужении бронзового корпуса припоями, при нарушении химического состава чушкового баббита, химического состава баббита БК2 в антифрикционном слое и других нарушений технологии, которые имеют место при изготовлении различными производителями. Предлагается:

– провести аудит всей нормативно-технической документации производителей бронзо-баббитовых подшипников, обратив внимание на составы бронз, полуды и баббита;

– выполнить проверку качества изготовления бронзо-баббитовых подшипников;

– усилить входной контроль за поставляемыми материалами, идущими на изготовление подшипников.

3. На основе выполненных исследований структуры баббита БК2 сделаны выводы о характере влияния кальция, магния, натрия на процессы кристаллизации баббита. Предложен механизм образования вспучиваний антифрикционного слоя и меры по снижению содержания натрия и магния в баббите, которые позволяют значительно снизить появление этого дефекта.

4. На основе изучения содержания химических элементов во вторичных структурах при трении с разным состоянием поверхностей сделаны выводы о характере влияния легирующих элементов на достижение структурной приспособляемости баббита к различным режимам трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буше Н.А. Подшипниковые сплавы для подвижного состава. М.: Транспорт, 1967. 222 с.
2. Захаров С.М., Никитин А.П., Загорянский Ю.А. Подшипники коленчатого вала тепловозных дизелей. М.: Транспорт, 1981. 181 с.
3. Изучение процесса кавитации и кавитационного изнашивания подшипников скольжения транспортных двигателей / С. М. Захаров [и др.] // Проблемы трения и изнашивания. Киев: Техника, 1973. Вып. 3. С. 61–68.
4. Мурманский Б.Е., Языков А.Е., Бродов Ю.Н. Ремонт подшипников паровых турбин: учеб. пособие для высш. техн. учеб. заведений. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 150 с.
5. Миронов А.Е. О качестве бронзо-баббитовых подшипников коленчатых валов дизелей тепловозов // Вестник ВНИИЖТ. 2002. № 6. С. 25–27.
6. Материаловедение и технология металлов / Б.Н. Арзамасов [и др.]. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 646 с.
7. Гершман И.С., Гершман Е.И., Миронов А.Е. Использование неравновесной термодинамики и теории самоорганизации для описания трибосистем и разработки износостойких материалов // Вестник БГТУ. 2016. № 4 (52). С. 32–38.

8. Banjac M., Vencel A., Otović S. Friction and Wear Processes – Thermodynamic Approach. Tribology in Industry. 2014. Vol. 36. No. 4. P. 341–347.

9. Nosonovsky M. Entropy in Tribology: in the Search for Applications. Entropy. 2010. Vol. 12. No. 6. P. 1345–1390.

10. Анализ путей совершенствования применяемых материалов и технологий изготовления подшипников коленчатого вала тепловозных дизелей / С. М. Захаров [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2015. № 6. С. 11–18.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

МИРОНОВ Александр Евгеньевич,

канд. техн. наук, ведущий специалист по инновационным проектам, отдел научно-исследовательских программ, грантов и проектов, АО «ВНИИЖТ»

ЗАХАРОВ Сергей Михайлович,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник отделения «Транспортное материаловедение», АО «ВНИИЖТ»

ФОКС-РАБИНОВИЧ Герман Симонович,

д-р техн. наук, старший научный сотрудник, университет Макмастера, Гамильтон, Канада

ЖЕЛЕЗНОВ Максим Максимович,

канд. техн. наук, заместитель Генерального директора – руководитель научно-образовательного комплекса, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 28.03.2017 г., принята к публикации 25.05.2017 г.

Analysis of the state of production and manufacturing quality of bronze-babbit bearings of the crankshaft of diesel locomotives

A. E. MIRONOV¹, S. M. ZAKHAROV¹, G. S. FOKS-RABINOVICH², M. M. ZHELEZNOV¹

¹ Joint Stock Company “Railway Research Institute” (JSC “VNIIZhT”), Moscow, 129626, Russia

² McMaster University, Hamilton, 1280, Canada

Abstract. The article gives the study on the areas of application of bronze-babbit bearings for diesel locomotives are considered. Information is provided on the types of diesel engines and locomotives for which they are installed, where such bearings are used. The main types of damage are described: fatigue and corrosion-cavitation wear and the factors affecting them. Authors presented results of research on technological factors that affect fatigue damage, such as the technology of tinning the bronze body with solders, the quality of pig babbit. The chemistry of calcium babbit and BK2 babbit in an antifriction layer is reviewed. The violations that occur during the manufacture of bearings by various manufacturers are described. The results of analysis of the influence of the chemical composition of babbit on its structure are presented. The influence of calcium and magnesium is described, in particular, on the formation of swelling on the babbit surface. The paper provides results of studies on the adaptability of the babbit layer to changes in friction conditions with the formation of various types of secondary structures. Micro-X-ray spectral studies of babbit layers of various liners and secondary structures on friction surfaces have been carried out. As the conclusion of the article the studies carried out and suggestions were made aimed at checking the quality of bronze-babbit bearings manufactured by various manufacturers.

Keywords: babbit; bearings; chemical composition; adaptability; secondary structures

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-131-137>

REFERENCES

1. Bushe N. A. *Podshipnikovye splavy dlya podvizhnogo sostava* [Bearing alloys for rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1967, 222 p.
2. Zakharov S. M., Nikitin A. P., Zagoryanskiy Yu. A. *Podshipniki kolenchatogo vala teplovoznnykh dizeley* [Crankshaft bearings of diesel engines]. Moscow, Transport Publ., 1981, 181 p.
3. Zakharov S. M., Bushe N. A., Zagoryanskiy Yu. A., Nikitin A. P. *Izuchenie protsessa kavitatsii i kavitatsionnogo iznashivaniya podshipnikov skol'zheniya transportnykh dvigateley. Problemy treniya i iznashivaniya* [Study of the process of cavitation and cavitation wear of sliding bearings of transport engines. Problems of friction and wear]. Kiev, Tekhnika Publ., 1973, Vol. 3, pp. 61–68.
4. Murmanskii B. E., Yazykov A. E., Brodov Yu. N. *Remont podshipnikov parovykh turbin: ucheb. posobie dlya vyssh. tekhn. ucheb. zavedeniy* [Repair of bearings of steam turbines: a manual for higher technical educational institutions]. Ekaterinburg, Ural University Publ., 2014, 150 p.

■ E-mail: abcd@gmail.com (A. E. Mironov)

5. Mironov A. E. *O kachestve bronzo-babbitovykh podshipnikov kolenchatykh valov dizeley teplovoznnykh dizeley* [On the quality of bronze-babbit bearings of crankshafts of diesel engines of railway locomotives]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2002, no. 6, pp. 25–27.

6. Arzamasov B. N., Makarova V. I., Mukhin G. G. *Materialovedenie i tekhnologiya metallov* [Material Science and Technology of Metals]. Moscow, MGTU n.a. N. E. Bauman Publ., 2002, 646 p.

7. Gershman I. S., Gershman E. I., Mironov A. E. *Ispol'zovanie neravnovesnoy termodinamiki i teorii samoorganizatsii dlya opisaniya tribosistem i razrabotki iznosostoykikh materialov* [The use of nonequilibrium thermodynamics and the theory of self-organization for the description of tribosystems and the development of wear-resistant materials]. Vestnik BGU, 2016, no. 4 (52), pp. 32–38.

8. Banjac M., Vencel A., Otović S. *Friction and Wear Processes – Thermodynamic Approach*. Tribology in Industry, 2014, Vol. 36, no. 4, pp. 341–347.

9. Nosonovsky M. *Entropy in Tribology: in the Search for Applications*. Entropy, 2010, Vol. 12, no. 6, pp. 1345–1390.

10. Zakharov S. M., Ermolaev A. A., Mironov A. E., Skvortsov A. E. *Analiz putey sovershenstvovaniya primenyaemykh materialov i tekhnologiy izgotovleniya podshipnikov kolenchatogo vala teplovoznnykh dizeley* [Analysis of ways to improve the materials used and technologies for manufacturing bearings of the crankshaft of diesel locomotives]. Tyazheloe mashinostroenie, 2015, no. 6, pp. 11–18.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksander E. MIRONOV,

Cand. Sci. (Eng.), leading Expert on innovative projects, Department of scientific-research programs, grants and projects, JSC “VNIIZhT”

Sergey M. ZAKHAROV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Department “Transport materials”, JSC “VNIIZhT”

German S. FOKS-RABINOVICH,

Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, McMaster University, Hamilton, Canada

Maksim M. Zheleznov,

Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director – Head of the scientific-educational complex, JSC “VNIIZhT”

Received 28.03.2017

Accepted 25.05.2017

Оценка интенсивности бокового и вертикального износов рельсов под проходящими поездами

А. Я. КОГАН

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. В статье изложена методика оценки бокового, вертикального и приведенного износов головки рельса при проходе по кривой всего многообразия обращающегося на рассматриваемом участке пути подвижного состава. Методика основана на использовании программ оценки вероятностных характеристик процессов взаимодействия пути и подвижного состава на участке с заданными зависимостями, характеризующими состояние пути по геометрии в плане, профиле и по уровню.

Ключевые слова: износ головки рельса; упругие и неупругие скольжения; трение; условия эксплуатации; проходящие поезда; пропущенный тоннаж

Задача определения величины бокового износа головки рельса под проходящими поездами. Рассмотрим сначала задачу определения величины бокового износа головки рельса под проходящими поездами.

При набегании колеса i единицы подвижного состава (далее — экипажа) конструкции j на наружную нитку кривой образуется забег b_{ij} колеса по отношению к рельсу, величина которого определяется равенством [1]

$$b_{ij} = r_j \operatorname{tg} \psi_{ij}^n \operatorname{tg} \tau_j \approx r_j \psi_{ij}^n \operatorname{tg} \tau_j, \quad (1)$$

где r_j — радиус колеса экипажа конструкции j ; ψ_{ij}^n — угол набегания колеса i экипажа конструкции j на рельс; τ_j — угол наклона гребня набегающего колеса i экипажа конструкции j к горизонту.

Если в точке контакта вращающегося набегающего колеса i конструкции экипажа j и боковой поверхностью рельса наружной нити кривой действует направляющая сила Y_{ij} , то возникает сила трения

$$T_{ij} = \mu_0 R_{ij}, \quad (2)$$

где μ_0 — коэффициент трения между поверхностями гребня колеса и рельса; R_{ij} — нормальная сила в точке контакта гребня набегающего колеса i экипажа конструкции j и боковой поверхности рельса.

Нормальная сила в точке контакта гребня набегающего колеса и боковой поверхности рельса определяется выражением [2]

$$R_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sin \tau_j - \mu_0 \cos \tau_j}. \quad (3)$$

Работа силы трения T_{ij} на перемещении ds , где ds — дифференциал пути, на котором совершает работу сила трения, определяется равенством

$$dA = T_{ij} ds. \quad (4)$$

Подставляя в (4) выражение (2) и учитывая равенство (3), получим

$$dA = \mu_0 Y_{ij} \frac{1}{\sin \tau_j - \mu_0 \cos \tau_j} ds. \quad (5)$$

Дифференциал ds связан с дифференциалом пути, пройденного колесной парой в направлении движения, соотношением

$$ds = \frac{b_{ij} dx}{r_j \sin \tau_j} = \psi_{ij}^n \operatorname{sec} \tau_j dx.$$

Подставляя полученный результат в (5), получим

$$dA = \mu_0 Y_{ij} \psi_{ij}^n \frac{\operatorname{sec} \tau_j}{\sin \tau_j - \mu_0 \cos \tau_j} dx. \quad (6)$$

Пусть при одиночном проходе по кривой i экипажа конструкции j боковая поверхность головки рельса упорной нитки кривой теряет площадь поперечного сечения ΔS_{ij}^B . Разделим обе части равенства (6) на величину ΔS_{ij}^B , тогда, учитывая, что $d\Omega^B = \Delta S_{ij}^B dx$ представляет собой дифференциал потери объема металла наружной рельсовой нити кривой при проходе i набегающей колесной парой экипажа конструкции j расстояния dx , получим

$$\frac{dA}{d\Omega^B} = \frac{1}{\Delta S_{ij}^B} \mu_0 Y_{ij} \psi_{ij}^n \frac{\operatorname{sec} \tau_j}{\sin \tau_j - \mu_0 \cos \tau_j}. \quad (7)$$

Так как отношение затраченной работы на износ к объему потерянного при износе материала представляет собой сопротивление износу C , получим следующую оценку площади сечения головки рельса, теряемой на боковой износ при одиночном проходе по кривой i набегающей оси экипажа конструкции j

$$\Delta S_j^B = \frac{1}{C} \mu_0 Y_{ij} \Psi_{ij}^H \frac{\sec \tau_j}{\sin \tau_j - \mu_0 \cos \tau_j}. \quad (8)$$

Понятие сопротивление износу применяется в настоящее время при оценке качества полимерных материалов. Применительно к стали используется понятие износостойкости, при этом износостойкость определяется как величина, обратная потере массы в образце при износных испытаниях [3].

Оценка износостойкости рельсов проводилась в лабораторных условиях при испытаниях на сухой износ образцов диаметром 40 мм и толщиной 4–6 мм, вырезанных вблизи поверхности катания [3]. Испытания проводились на машине Амслера при трении качения с десятипроцентным проскальзыванием. В качестве контртела применялись ролики из колесной стали. Износ оценивали по потере массы после $7 \cdot 10^4$ оборотов роликов, прижатых друг к другу силой 0,3–0,7 кН [3].

Работа, затрачиваемая на износ одного образца, может быть определена по формуле:

$$A = \mu^* P^* L, \quad (9)$$

где μ^* — коэффициент трения при десятипроцентном проскальзывании образца относительно контртела; P^* — сила прижатия роликов; L — путь, пройденный поверхностью образца в фрикционном режиме в процессе испытаний.

Коэффициент трения μ^* может быть принят равным коэффициенту сцепления колеса локомотива с рельсом в первой стадии начавшегося боксования ($\mu^* = 0,16$), когда процент проскальзывания близок к 10 %.

Силу P^* примем равной средней величине прижатия роликов при испытаниях ($P^* = 0,5$ кН).

Величина L может быть определена соотношением

$$L = \pi d n \epsilon, \quad (10)$$

где d — диаметр образца ($d = 40$ мм); n — число оборотов роликов ($n = 7 \cdot 10^4$); ϵ — процент проскальзывания ($\epsilon = 0,1$).

Теперь можно определить константу B , связывающую сопротивление износу C с износостойкостью I^*

$$C = B I^*, \quad (11)$$

где $B = A \Omega$. (12)

В выражении (12) величина Ω представляет собой массу, содержащуюся в единице объема рельсовой стали $\Omega = 7,8 \cdot 10^{-3}$ г/мм³.

Определим численное значение коэффициента B .

Подставляя в (12) выражения (9) и (10), получим

$$B = \pi \mu^* P^* d n \epsilon \Omega = 3,14 \cdot 0,16 \cdot 0,5 \cdot 40 \cdot 7 \cdot 10^4 \cdot 0,1 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 5,5 \cdot 10^2 \text{ кНг/мм}^2.$$

Или, подставляя в (11) полученный результат, окончательно получим

$$C = 5,5 \cdot 10^2 \cdot I^* \text{ [кН/мм}^2\text{]}. \quad (13)$$

Формулу (8) можно использовать для получения общей площади поперечного сечения головки рельса, потерянной в результате фрикционного взаимодействия рельса с гребнями набегающих колес проходящего по кривой подвижного состава. Очевидно, можно записать

$$S^B = \frac{\mu_0 N}{C} \sum_{j=1}^M \beta_j \frac{\sec \tau_j}{\sin \tau_j - \mu_0 \cos \tau_j} G_j^B, \quad (14)$$

где S^B — общая площадь поперечного сечения головки рельса, потерянная в результате истирания боковой грани рельса гребнями колес проходящих поездов; N — общее количество экипажей, прошедших по заданной кривой; M — общее число конструкций экипажей, обращающихся на рассматриваемом участке; β_j — доля экипажей, имеющих параметры конструкции j , движущихся с заданными скоростями и определенными осевыми нагрузками, в общем многообразии экипажей, обращающихся на рассматриваемом участке пути; G_j^B — среднее значение комплексного показателя, определяющего боковой износ головки рельса при проходе по кривой экипажа конструкции j .

Величина G_j^B может быть вычислена по формуле:

$$G_j^B = \sum_{i=1}^{n_j^H} \langle Y_{ij} \Psi_{ij}^H \rangle = \sum_{i=1}^{n_j^H} \left[\langle Y_{ij} \rangle \langle \Psi_{ij}^H \rangle + K_{Y_{ij} \Psi_{ij}^H} \right], \quad (15)$$

где n_j^H — количество набегающих колесных пар в экипаже конструкции j ; $\langle Y_{ij} \rangle$ — среднее значение направляющей силы, действующей от гребня i набегающей колесной пары экипажа конструкции j на наружную рельсовую нить; $\langle \Psi_{ij}^H \rangle$ — среднее значение угла между осью i колесной пары и нормалью к продольной оси пути x в точке расположения этой колесной пары; $K_{Y_{ij} \Psi_{ij}^H}$ — корреляционный момент (ковариация) случайных величин Y_{ij} и Ψ_{ij}^H .

Методы определения величин $\langle Y_{ij} \rangle$, $\langle \Psi_{ij}^H \rangle$ и $K_{Y_{ij} \Psi_{ij}^H}$ изложены в книге [2], а расчет этих величин может быть осуществлен по программе [4].

Величина бокового износа головки рельса связана с площадью поперечного сечения рельса, потерянной в результате износа. На рис. 1 приведен пример графика такой зависимости.

Таким образом, величина бокового износа головки рельса δ^B в рассматриваемой кривой определится выражением

$$\delta^B = k_n \Phi_B \{ S^B \} = k_n \Phi_B \left\{ \frac{\mu_0 N}{C} \sum_{j=1}^M \beta_j \frac{\sec \tau_j}{\sin \tau_j - \mu_0 \cos \tau_j} \sum_{i=1}^{n_j^H} \left[\langle Y_{ij} \rangle \langle \Psi_{ij}^H \rangle + K_{Y_{ij} \Psi_{ij}^H} \right] \right\}, \quad (16)$$

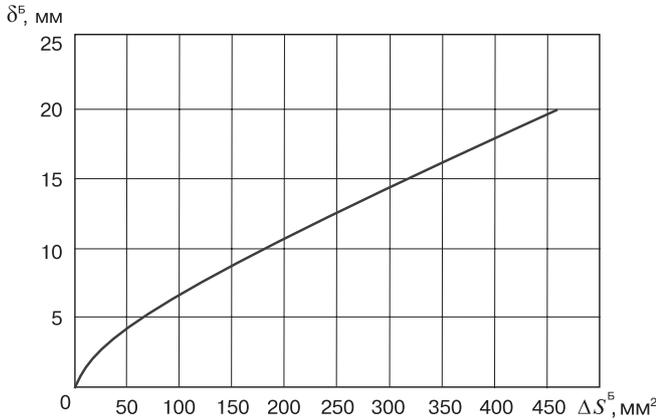


Рис. 1. График зависимости величины бокового износа δ^δ от площади потерянного металла ΔS^δ для рельса Р65
 Fig. 1. Graph of the dependence of the value δ^δ of lateral wear on the area of the lost metal ΔS^δ for the rail R65

где k_δ — коэффициент, корректирующий величину бокового износа головки рельса от повышенного воздействия локомотивов в режиме тяги.

В первом приближении этот коэффициент может быть принят:

- на участках с уклоном 12–15‰ — $k_\delta = 1,05$;
- на горно-перевальных участках — $k_\delta = 1,1$.

Для оценки **вертикального износа головки рельса** воспользуемся следующей методикой. Работа сил трения при вертикальном износе рельсов при проходе i колеса экипажа конструкции j по v -й рельсовой нити ($v = 1$ — индекс наружной нити кривой, $v = 2$ — внутренней) на участке dx составляет величину

$$dA = F_{vj} dx, \tag{17}$$

где F_{vj} — обобщенная сила, действующая на перемещений dx и развивающая такую же мощность, что и сила трения в контакте поверхностей катания колеса и головки рельса.

Таким образом,

$$F_{vj} V = P_{vj} \mu_{\max} |W_{ij}^*| V, \tag{18}$$

где P_{vj} — вертикальная сила, действующая на поверхности катания рельсовой нити v от i колеса экипажа конструкции j ; μ_{\max} — максимальный коэффициент трения, при котором реализуются только неупругие скольжения колеса по рельсу; V — скорость движения экипажа; $|W_{ij}^*|$ — модуль относительной скорости неупругого скольжения колеса по рельсу.

Модуль относительной скорости неупругого скольжения колеса по рельсу может быть определен из выражения [5]

$$|W_{ij}^*| = \sqrt{|u_{ij}^*|^2 + |v_{ij}^*|^2}, \tag{19}$$

где $|u_{ij}^*|$ — модуль относительной скорости поперечного неупругого скольжения, направленного перпендикулярно направлению движения колеса; $|v_{ij}^*|$ — модуль относительной скорости продольного неупругого скольжения, направленного вдоль направления движения колеса.

В выражении (19) приведены соотношения относительных скоростей поперечного, продольного и суммарного неупругих скольжений колеса по рельсу по модулю. Это связано с тем, что в дальнейшем для оценки вертикального износа головки рельса будет производиться осреднение случайных значений относительных скоростей этих скольжений, которые могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

При одиночном проходе i колеса экипажа конструкции j по участку dx рельсовой нити v дифференциал потерянного на вертикальный износ объема металла составит:

$$d\Omega^B = \Delta S_{vj}^B dx, \tag{20}$$

где ΔS_{vj}^B — площадь поперечного сечения головки рельса, теряемая при вертикальном износе при проходе i колеса экипажа конструкции j по v -й рельсовой нити кривой.

Разделив левую часть равенства (17) на левую часть равенства (20), а правую часть равенства (17) на правую часть равенства (20) и учитывая соотношение (18), получим:

$$\frac{dA}{d\Omega^B} = \frac{P_{vj} \mu_{\max} |W_{ij}^*|}{\Delta S_{vj}^B} = C. \tag{21}$$

Величины вертикальных сил, передающихся от i набегающей колесной пары экипажа конструкции j на поверхности катания рельсов наружной ($v = 1$) и внутренней ($v = 2$) рельсовых нитей, определяются равенствами [2]

$$P_{1j}^n = Q_{1j} - \frac{\cos \tau_j + \mu_0 \sin \tau_j}{\sin \tau_j - \mu_0 \cos \tau_j} Y_{1j}; \tag{22}$$

$$P_{2j} = Q_{2j}, \tag{23}$$

где Q_{vj} — суммарная вертикальная нагрузка, передаваемая от колесной пары i экипажа конструкции j на наружную ($v = 1$) и внутреннюю ($v = 2$) рельсовые нити кривой.

Появление второго слагаемого в формуле (22) объясняется тем, что часть вертикальной нагрузки от i колесной пары экипажа конструкции j на внешнюю нить кривой передается на рельс через гребень набегающего колеса.

Для ненабегающей колесной пары

$$P_{1j} = Q_{1j} \tag{24}$$

Формула (21) позволяет оценить площадь поперечного сечения головки рельса, теряемую на вертикальный износ v рельсовой нити кривой при одиночном проходе i колесной пары экипажа конструкции j

$$\Delta S_{v_{ij}}^B = \frac{1}{C} \mu_{\max} P_{v_{ij}} |W_{ij}^*|. \quad (25)$$

Используя формулу (25) можно получить значение общей площади поперечного сечения головки рельса, потерянной при фрикционном взаимодействии поверхностей катания рельса и колес проходящего по кривой подвижного состава. Очевидно, по аналогии с формулой (11) можно записать

$$S_v^B = \sum_j \sum_i^{n_j} \Delta S_{v_{ij}}^B = \frac{\mu_{\max}}{C} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} P_{v_{ij}} |W_{ij}^*|, \quad (26)$$

где S_v^B — общая площадь поперечного сечения рельса, потерянная при вертикальном износе рельсов наружной и внутренней ниток кривой; n_j — общее количество колесных пар в экипаже конструкции j .

При большом количестве прошедших по кривой единиц подвижного состава выражение (26) примет вид

$$S_v^B = \frac{\mu_{\max} N}{C} \sum_{j=1}^M \beta_j G_{v_j}^B, \quad (27)$$

где $G_{v_j}^B = \sum_{i=1}^{n_j} \langle P_{v_{ij}} |W_{ij}^*| \rangle$ — среднее значение комплексного показателя, определяющего вертикальный износ головок рельсов наружной ($v = 1$) и внутренней ($v = 2$) нитей кривой.

Пренебрегая корреляцией случайных величин $P_{v_{ij}}$ и $|W_{ij}^*|$ можно записать

$$G_{v_j}^B = \sum_{i=1}^{n_j} \langle P_{v_{ij}} \rangle \langle |W_{ij}^*| \rangle. \quad (28)$$

С учетом формул (22) и (23) средние значения величин для набегающих колесных пар определяются так:

$$\begin{cases} \langle P_{1j} \rangle = \langle Q_{1j} \rangle - \frac{\cos \tau_j + \mu_0 \sin \tau_j}{\sin \tau_j - \mu_0 \cos \tau_j} \langle Y_{1j} \rangle; \\ \langle P_{2j} \rangle = \langle Q_{2j} \rangle. \end{cases} \quad (29)$$

Для ненабегающих колесных пар $\langle P_{ij} \rangle = \langle Q_{ij} \rangle$.

Приступим теперь к определению среднего значения модуля относительной скорости неупругого скольжения колеса по рельсу $\langle |W_{ij}^*| \rangle$, определяемого выражением (19). Отметим сразу, что модули относительных скоростей продольного и поперечного неупругих скольжений связаны соотношением [5, 6]

$$\frac{|v_{ij}^*|}{|u_{ij}^*|} = \operatorname{tg} \alpha_{ij}, \quad (30)$$

где α_{ij} — угол, определяемый вписыванием экипажа конструкции j в кривую радиуса $\langle \rho \rangle$

$$\operatorname{tg} \alpha_{ij} = \frac{S_1}{2(a_{ij} - a_{ij}^* - x_{c_{ij}})}. \quad (31)$$

В выражении (31) введены следующие обозначения: a_{ij} — координата по продольной оси x центра масс i колесной пары тележки I экипажа конструкции j ; a_{ij}^* — координата по продольной оси x центра масс I тележки экипажа конструкции j ; $x_{c_{ij}} = \langle \rho \rangle \langle \psi_I^+ \rangle$ — расстояние от центра тяжести тележки I экипажа конструкции j до полюса ее поворота при вписывании экипажа в кривую; $\langle \rho \rangle$ — средний радиус кривой; $\langle \psi_I^+ \rangle$ — средний угол поворота тележки I , отсчитываемый от направления касательной к проектной оси пути в точке центра тяжести тележки I ; $2S_1$ — расстояние между кругами катания колесной пары.

С учетом соотношения (30) выражение (19) примет вид

$$|W_{ij}^*| = |u_{ij}^*| \operatorname{sec} \alpha_{ij}. \quad (32)$$

Здесь в обозначениях величин не введен дополнительный индекс I с учетом того, что все колесные пары экипажа конструкции j могут быть пронумерованы по одному индексу i .

Таким образом, для оценки величины $G_{v_j}^B$, определяемой формулой (28), достаточно вычислить среднее значение модуля относительной скорости поперечного неупругого скольжения $\langle |u_{ij}^*| \rangle$, так как

$$\langle |W_{ij}^*| \rangle = \langle |u_{ij}^*| \rangle \operatorname{sec} \alpha_{ij}. \quad (33)$$

Неупругая составляющая относительной поперечной скорости скольжения колес по рельсу u_{ij}^* связана с суммарной относительной скоростью поперечного скольжения u_j параметрически

$$u_j = \begin{cases} \frac{1}{\alpha_1} Y_{f_j} \text{ при } 0 \leq Y_{f_j} \leq (1-a) \langle Q_{0_j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij}; \\ \frac{1}{\alpha_1} Y_{f_j} + \left[1 - \sqrt{1 - \frac{1}{a^2} \left(\frac{Y_{f_j}}{\langle Q_{0_j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij}} - (1-a) \right)^2} \right] b \cos \alpha_{ij}; \end{cases} \quad (34)$$

при $(1-a) \langle Q_{0_j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij} \leq Y_{f_j} < \langle Q_{0_j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij}$.

$$u_j^* = \begin{cases} 0 \text{ при } 0 \leq Y_{f_j} \leq (1-a) \langle Q_{0_j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij}; \\ \left[1 - \sqrt{1 - \frac{1}{a^2} \left(\frac{Y_{f_j}}{\langle Q_{0_j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij}} - (1-a) \right)^2} \right] b \cos \alpha_{ij}; \end{cases} \quad (35)$$

при $(1-a) \langle Q_{0_j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij} \leq Y_{f_j} < \langle Q_{0_j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij}$,

где $2 \langle Q_{0_j} \rangle$ — средняя осевая нагрузка экипажа конструкции j ; α_1 — коэффициент поперечного крипа;

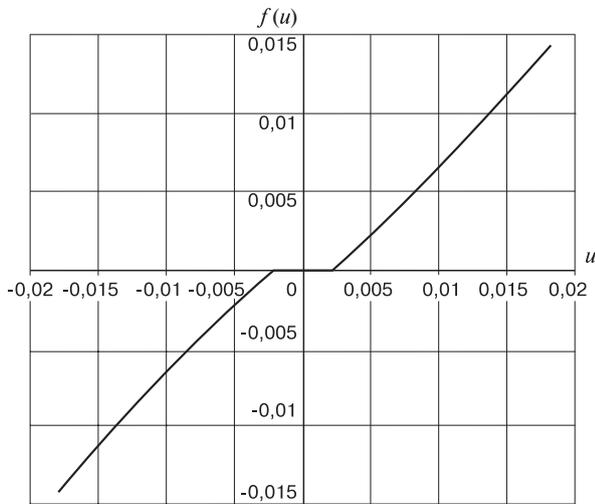


Рис. 2, а. Зависимость неупругой составляющей относительной скорости скольжения $u^* = f(u)$ от суммарной относительной скорости скольжения u при $\alpha_{ij} = 0$

Fig. 2, a. Dependence of the nonelastic component of the relative slip velocity $u^* = f(u)$ on the total relative sliding speed u at $\alpha_{ij} = 0$

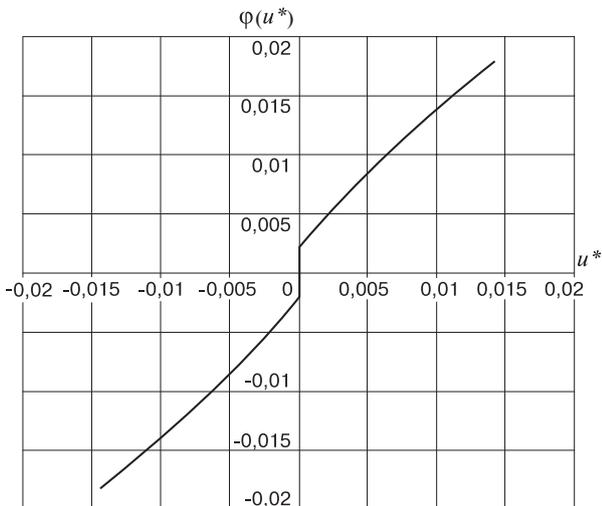


Рис. 2, б. Зависимость суммарной относительной скорости скольжения $u = \varphi(u^*)$ от ее неупругой составляющей u^* при $\alpha_{ij} = 0$

Fig. 2, б. Dependence of the total relative slip velocity $u = \varphi(u^*)$ on its inelastic component u^* at $\alpha_{ij} = 0$

a, b — коэффициенты эллиптической аппроксимации кривой крипа.

Соотношения (34) и (35) относятся к интервалу значений параметра $Y_{f_{ij}}$, определяемому неравенствами $0 \leq Y_{f_{ij}} < \langle Q_{0,j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij}$.

При отрицательных значениях параметра $Y_{f_{ij}}$ относительные скорости скольжений u и u^* могут быть определены с учетом кривой симметрии функций $u(Y)$ и $u^*(Y)$:

$$\begin{aligned} u_{ij}(-Y_{f_{ij}}) &= -u_{ij}(Y_{f_{ij}}); \\ u_{ij}^*(-Y_{f_{ij}}) &= -u_{ij}^*(Y_{f_{ij}}). \end{aligned}$$

В выражениях (34) и (35) в качестве связующего параметра выступает поперечная сила трения, действующая на поверхности катания рельса $Y_{f_{ij}}$.

Из равенств (34), (35) следует, что при

$$Y_{f_{ij}} = \langle Q_{0,j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij} \text{ и } u_{ij} = \left(b + \frac{\langle Q_{0,j} \rangle}{\alpha_1} \mu_{\max} \right) \cos \alpha_{ij}$$

имеем

$$u_{ij}^* = b \cos \alpha_{ij}; \tag{36}$$

$$u_{ij} = \frac{1}{\alpha_1} Y_{f_{ij}} + b \cos \alpha_{ij} = u_{ij}^* + \frac{\langle Q_{0,j} \rangle}{\alpha_1} \mu_{\max} \cos \alpha_{ij}. \tag{37}$$

При дальнейшем увеличении относительной скорости суммарного поперечного скольжения u_{ij} относительная скорость упругого скольжения сохраняет-

ся, так что при $u_{ij} > \left(b + \frac{\langle Q_{0,j} \rangle}{\alpha_1} \mu_{\max} \right) \cos \alpha_{ij}$ сохраняется

неизменным равенство (37), связывающее суммарную относительную скорость поперечного скольжения колеса по рельсу с ее неупругой составляющей.

Для получения отдельных точек параметрически заданной функции $u^* = f_{ij}(u)$ значения величин u_{ij} и u_{ij}^* по формулам (34) и (35) целесообразно вычислять, начиная со значения $Y_{f_{ij}} = (1-a) \langle Q_{0,j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij}$, так как при $Y_{f_{ij}} < (1-a) \langle Q_{0,j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij}$ $u^* \equiv 0$. При $\cos \alpha_{ij} > 0,8$ значения величин u_{ij} и u_{ij}^* можно также вычислять, задаваясь величинами параметра $Y_{f_{ij}}$ с равными интервалами $\Delta Y_{f_{ij}} = 0,001(1-a) \langle Q_{0,j} \rangle \mu_{\max} \cos \alpha_{ij}$, начиная со значения $Y_{f_{ij}} = 0$.

На рис. 2, а представлен график значений функции $u^* = f_{ij}(u)$, которые вычислены по формулам (34) и (35) при следующих параметрах: $a = 0,48$; $b = 0,0155$; $\mu_{\max} = 0,35$; $\langle Q_{0,j} \rangle = 115$ кН; $\alpha_1 = 10834$ кН; $\alpha_{ij} = 0$. На рис. 2, б приведен график обратной функции $u = \varphi_{ij}(u^*)$, полученный при тех же параметрах.

Учитывая косую симметрию (нечетность) функций $u^* = f_{ij}(u)$ и $u = \varphi_{ij}(u^*)$ и, в частности, равенство $f_{ij}(0) = \varphi_{ij}(0) = 0$, можно констатировать однозначное соответствие взаимно-обратных функций $u^* = f_{ij}(u)$ и $u = \varphi_{ij}(u^*)$.

Функцию распределения случайной величины u_{ij} можно считать заданной, поскольку два параметра — среднее значение $\langle u_{ij} \rangle = \langle \psi_{ij} \rangle$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_{u_{ij}}$ могут быть вычислены по методике, изложенной в [2], с использованием программы ВЭИП [4].

Считая, что случайная величина u_{ij} имеет нормальное распределение, получим следующее выражение для плотности вероятности этой величины

$$\omega_{u_{ij}}(x) = \frac{1}{\sigma_{u_{ij}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \langle \psi_{ij} \rangle)^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}}. \tag{38}$$

Как уже было сказано, случайная величина u_{ij}^* является функцией случайной величины u_{ij} . Так как обратная величина $u = \varphi_{ij}(u^*)$ однозначна, может быть вычислено среднее значение величины u_{ij}^* по формуле [7]

$$\langle u_{ij}^* \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f_{ij}(x)\omega(x)dx, \quad (39)$$

Так как на интервале

$$-(1-a)\frac{\langle Q_{0j} \rangle}{\alpha_1} \mu_{\max} \cos \alpha_{ij} \leq x \leq (1-a)\frac{\langle Q_{0j} \rangle}{\alpha_1} \cos \alpha_{ij}$$

функция $f_{ij}(x)$ тождественно равна нулю, выражение (39) может быть записано в виде

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{ij}(x)\omega(x)dx = \int_{-\infty}^{-u_{0j}} f_{ij}(x)\omega(x)dx + \int_{u_{0j}}^{\infty} f_{ij}(x)\omega(x)dx, \quad (40)$$

где $u_{0j} = (1-a)\frac{\langle Q_{0j} \rangle}{\alpha_1} \mu_{\max} \cos \alpha_{ij}$.

Подставляя в (39) выражения (38) и (40) и учитывая косую симметрию функции $f_{ij}(x)$, получим

$$\langle u_{ij}^* \rangle = \frac{1}{\sigma_{u_{ij}} \sqrt{2\pi}} \int_{u_{0j}}^{\infty} f_{ij}(x) \left[e^{-\frac{(\langle \Psi_{ij} \rangle - x)^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}} - e^{-\frac{(\langle \Psi_{ij} \rangle + x)^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}} \right] dx \quad (41)$$

Функции $f_{ij}(u)$ и $\varphi_{ij}(u^*)$, как уже ранее отмечалось, задаются параметрически через параметр $Y_{f_{ij}}$ в виде двух взаимосвязанных числовых последовательностей $u = u(Y_{f_{ij}})$ и $u^* = u^*(Y_{f_{ij}})$.

Хотя параметр $Y_{f_{ij}}$ задается с постоянным шагом, последовательности $u = u(Y_{f_{ij}})$ и $u^* = u^*(Y_{f_{ij}})$ имеют переменные шаги. В связи с этим интегрирование выражения (41) будем производить по формуле трапеций с переменным шагом. В рассматриваемом случае при $\cos \alpha_{ij} = 0$ имеем

$$\begin{aligned} \langle u_{ij}^* \rangle &= \frac{1}{\sigma_{u_{ij}} \sqrt{2\pi}} \sum_{m=1000}^{m=M_u} \frac{f(u_m) + f(u_{m+1})}{2} (u_{m+1} - u_m) \times \\ &\times \frac{1}{2} \left[e^{-\frac{(\langle \Psi_{ij} \rangle - u_m)^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}} + e^{-\frac{(\langle \Psi_{ij} \rangle - u_{m+1})^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}} - \right. \\ &\left. - e^{-\frac{(\langle \Psi_{ij} \rangle + u_m)^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}} - e^{-\frac{(\langle \Psi_{ij} \rangle + u_{m+1})^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}} \right]. \end{aligned} \quad (42)$$

Верхний предел суммы M_u может быть определен по ее сходимости к постоянной величине

$$\lim_{M_u \rightarrow \infty} \langle u_{ij}^* \rangle = const.$$

Для того, чтобы получить выражение для среднего значения модуля относительной скорости поперечного неупругого скольжения колес по рельсу $\langle |u_{ij}^*| \rangle$ достаточно в выражении (42) сменить знак минус на

плюс у двух слагаемых $e^{-\frac{(\langle \Psi_{ij} \rangle + u_m)^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}}$ и $e^{-\frac{(\langle \Psi_{ij} \rangle + u_{m+1})^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}}$ под знаком суммы. Таким образом, можно записать

$$\begin{aligned} \langle |u_{ij}^*| \rangle &= \frac{1}{\sigma_{u_{ij}} \sqrt{2\pi}} \sum_{m=1000}^{m=M_u} \frac{f(u_m) + f(u_{m+1})}{2} (u_{m+1} - u_m) \times \\ &\times \frac{1}{2} \left[e^{-\frac{(\langle \Psi_{ij} \rangle - u_m)^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}} + e^{-\frac{(\langle \Psi_{ij} \rangle - u_{m+1})^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}} + \right. \\ &\left. + e^{-\frac{(\langle \Psi_{ij} \rangle + u_m)^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}} + e^{-\frac{(\langle \Psi_{ij} \rangle + u_{m+1})^2}{2\sigma_{u_{ij}}^2}} \right]. \end{aligned} \quad (43)$$

После того как величина среднего значения модуля относительной скорости поперечного неупругого скольжения колес по рельсу $\langle |u_{ij}^*| \rangle$ вычислена, может быть определена с учетом (25) и (30) величина комплексного показателя $G_{v_j}^B$, определяющего вертикальный износ головки рельса наружной ($v = 1$) и внутренней ($v = 2$) нитей кривой при проходе экипажа конструкции j с заданной скоростью

$$G_{v_j}^B = \sum_{i=1}^{n_j} \langle P_{v_j} \rangle \langle |u_{ij}^*| \rangle \sec \alpha_{ij}. \quad (44)$$

Вернемся теперь к анализу выражения (27), определяющего площадь поперечного сечения головки рельса, теряемую при вертикальном износе рельса. Величина вертикального износа головки рельса связана с площадью поперечного сечения, потерянной в результате износа. На рис. 3 приведен пример графика такой зависимости. С учетом сказанного величина вертикального износа головки рельса в рассматриваемой кривой определится так

$$\delta_v^B = k_T \Phi_B \{ S_v^B \} = k_T \Phi_B \left\{ \frac{\mu_{\max} N}{C} \sum_{j=1}^M \beta_j G_{v_j}^B \right\}, \quad (45)$$

где $G_{v_j}^B$, определяется выражением (44).

Параметры β_j были введены ранее при выводе формулы (14).

Коэффициент k_T вводится для корректировки величины вертикального износа головки рельса на участках систематического применения пневматического торможения поездов. В первом приближении этот коэффициент может быть принят равным $k_T = 1,15$.

При необходимости может быть вычислен приведенный износ головки рельса по формулам

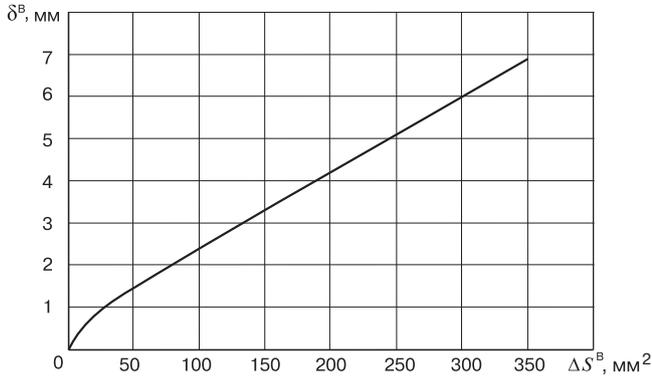


Рис. 3. График зависимости вертикального износа рельса δ^B от площади потерянного металла ΔS^B для рельса Р65
 Fig. 3. Graph of the dependence of the vertical lateral of rail wear δ^B on the area of the lost metal ΔS^B for the rail R65

$$\begin{cases} \delta_1^{np} = \delta_1^B + \frac{1}{2}\delta^B; \\ \delta_2^{np} = \delta_2^B. \end{cases} \quad (46)$$

Величина пропущенного по кривой тоннажа брутто может быть определена так

$$T = \frac{1}{g} \langle 2Q_0 \rangle N \langle n_j \rangle, \quad (47)$$

где $\langle 2Q_0 \rangle = 2 \sum_{j=1}^M \beta_j \langle Q_{0j} \rangle$ — средняя осевая нагрузка экипажей на участке; $\langle n_j \rangle = \sum_{j=1}^M \beta_j n_j$ — средневзвешенное число осей в экипажах, обращающихся на участке; g — ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Из формулы (47) может быть определено общее количество экипажей, прошедших по заданному участку пути в зависимости от прошедшего тоннажа брутто

$$N = \frac{Tg}{\langle 2Q_0 \rangle \langle n_j \rangle}. \quad (48)$$

Интенсивность бокового износа J^B может быть определена как отношение площади поперечного сечения головки рельса, потерянной в результате истирания боковой грани головки гребнями колес проходящих поездов ΔS^B , к пропущенному по кривой тоннажу брутто T . Подставляя в выражение (14) соотношение (48), получим

$$J^B = 10^6 \frac{\mu_0 g}{C \langle 2Q_0 \rangle \langle n_j \rangle} \sum_{j=1}^M \beta_j \frac{\sec \tau_j}{\sin \tau_j - \mu_0 \cos \tau_j} G_j^B, \quad (49)$$

где величина G_j^B определяется выражением (15).

Точно так же интенсивность вертикального износа J^B может быть определена как отношение площади поперечного сечения рельса, потерянной при вертикальном износе к пропущенному по участку пути

тоннажа брутто T . Подставляя в (27) выражение (48), получим

$$J^B = 10^6 \frac{\mu_{\max} g}{C \langle 2Q_0 \rangle \langle n_j \rangle} \sum_{j=1}^M \beta_j G_{vj}^B, \quad (50)$$

где величина G_{vj}^B определяется выражением (28).

Множитель 10^6 в формулах (49) и (50) введен в связи с тем, что размерность интенсивности износа удобна вести в единицах $\text{мм}^2/\text{млн т брутто}$.

Формулы (16), (45), (46), (49) и (50) позволяют определить величины бокового, вертикального и приведенного износов головок рельсов, а также их интенсивностей.

В заключение отметим, что изложенные методы определения величины вертикального износа рельсов относятся как к кривым, так и к прямым участкам пути.

Закключение. Предложена методика оценки величин интенсивностей бокового и вертикального износов головок рельсов в кривых участках пути под воздействием проходящих поездов. Данная методика определения вертикального износа головки рельса относится также и к прямым участкам пути. Приведенные количественные оценки бокового и вертикального износов головок рельсов могут быть использованы для решения ряда эксплуатационных задач. Например, влияние несоответствия возвышения рельса в кривых скоростям движения грузовых поездов на боковой износ наружного рельса и вертикальный износ внутреннего рельса, что имеет место при смешанном движении грузовых и пассажирских поездов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 560 с.
2. Коган А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М.: Транспорт, 1997. 326 с.
3. Золотарский А.Ф., Раузин Я.Р., Шур Е.А. Термически упрочненные рельсы. М.: Транспорт, 1976. 264 с.
4. Воздействие экипажа на путь при пространственных колебаниях подвижного состава: описание программы / А.Я. Коган [и др.] // Информационный бюллетень ВНИИ-Центр ГОСФАП. 1985. № 4/67. 40 с.
5. Коган А.Я. Взаимодействие колеса и рельса при качении // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 8. С. 26–38.
6. Коган А.Я., Загитов Э.Д., Полещук И.В. Случайные процессы взаимодействия пути и подвижного состава. М.: РАС, 2016. 208 с.
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники: в 3 т. Т. 1. М.: Советское радио, 1969. С. 117–118.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

КОГАН Александр Яковлевич,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 26.04.2017 г., принята к публикации 31.05.2017 г.

Evaluation of the intensity of lateral and vertical wear of rails under passing trains

A. Ya. Kogan

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. The article presents the fundamentals of methods for estimating lateral and vertical wear of the rail head, as well as their intensity, depending on the geometric and force interaction of the rails and wheels of the rolling stock running in a given section in a stochastic setting. The problem is solved for the general case of the entire manifold of the rolling stock (including various design features) running along a curve of a given radius for a given elevation of the outer rail (or tangent section). The track section is characterized by the main dynamic parameters of the structure of railway superstructure, as well as the specified probabilistic characteristics of random processes that determine its state in terms of plan, profile and level.

The quantitative estimates of lateral and vertical wear of the rail head in the article can be used to solve a number of operational problems. For example, it is possible to estimate the effect of the mismatch between the elevation of the outer rail in the curves on the lateral wear of the outer rail and the vertical wear of the inner rail with the mixed traffic of freight and passenger trains.

Keywords: wear of rail head; elastic and nonelastic slip; friction; operation conditions; passed trains; passed tonnage

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-138-145>

REFERENCES

1. Verigo M. F., Kogan A. Ya. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [Track and railway vehicle interaction]. Moscow, Transport Publ., 1986, 560 p.

2. Kogan A. Ya. *Dinamika puti i ego vzaimodeystvie s podvizhnym sostavom* [Tracks dynamics and its interaction with rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1997, 326 p.

3. Zolotarskiy A. F., Rauzin Ya. R., Shur E. A. *Termicheski uprochnennye rel'sy* [Termally hardened rails]. Moscow, Transport Publ., 1976, 264 p.

4. Kogan A. Ya., Voytov I. O., Levinzon M. A., Gavrilov V. M., Perelshtein A. L. *Vozdeystvie ekipazha na put' pri prostranstvennykh kolebaniyakh podvizhnogo sostava. Opisanie programmy* [Exposure of the carriage to the track with spatial variations of the rolling stock. Program description]. *Informatsionnyy byulleten' VNTI-Tsentr GOSFAP* [Information bulletin of VNTI Center of GOSFAP], 1985, no. 4/67, 40 p.

5. Kogan A. Ya. *Vzaimodeystvie koleasa i rel'sa pri kachenii* [The interaction of the wheel and rail during rolling]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh* [Friction and lubrication in machines and mechanisms], 2008, no. 8, pp. 26–38.

6. Kogan A. Ya., Zagitov E. D., Poleshchuk I. V. *Sluchaynye protsessy vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava* [Random processes of interaction of the track and rolling stock]. Moscow, RAS Publ., 2016, 208 p.

7. Levin B. R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki* [Theoretical bases of statistical radio engineering]. Moscow, Sovetskoe radio [Soviet radio] Publ., 1969, Vol. 1, pp. 117–118.

ABOUT THE AUTHOR

Alexander Ya. KOGAN,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, JSC "VNIIZhT"

Received 26.04.2017

Accepted 31.05.2017

E-mail: suslov.oleg@vniizht.ru (A. Ya. Kogan)

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ ПОДПИСАТЬСЯ?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ.

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (499) 260-43-19, факс: +7 (499) 262-00-70, E-mail: journal@vniizht.ru.

Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья могут подписаться на журнал «Вестник ВНИИЖТ» по каталогам подписного агентства АО «МК-Периодика» (www.periodicals.ru).

Технологический процесс работы центра управления перевозками восточного полигона (ЦУП ВП)

В. Л. ЗОБНИН¹, А. Т. ОСЬМИНИН², Е. А. СОТНИКОВ², М. А. ОСЬМИНИН²

¹ Центральная дирекция управления движением открытого акционерного общества «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»), Москва, 129090, Россия

² Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Рассмотрена технология единого управления перевозочным процессом на восточном полигоне (ВП) сети ОАО «РЖД», включающем в себя четыре железные дороги: Красноярскую, Восточно-Сибирскую, Забайкальскую и Дальневосточную. Управляющему органу полигона — ЦУП ВП переданы полномочия по нормативному обеспечению перевозочного процесса и управлению оперативной работой, выполнение которых ранее предусматривалось на центральном и дорожном уровнях. Рассмотрены полигонная технология работы ЦУП ВП в области графика движения и плана формирования поездов, порядок нормирования и предоставления «окон» для ремонтно-строительных работ, логистического обеспечения перевозок, оперативного управления перевозочным процессом, информационного обеспечения и оценки деятельности ЦУП ВП. Представлена структура управления. Разработанный технологический процесс работы ЦУП ВП должен стать основой для решения практических задач в области внедрения полигонной технологии управления перевозочным процессом, как на восточном полигоне, так и на других полигонах сети ОАО «РЖД».

Ключевые слова: технологический процесс; восточный полигон; нормативное обеспечение; оперативное управление; информационное обеспечение; структура управления; показатели работы

Введение. В организации перевозочного процесса ОАО «РЖД» осуществляется переход к полигонным технологиям. Это означает, что управление поездопотоками, поездными локомотивами, организацией грузовой работы, предоставлением «окон» для ремонтно-строительных работ и другими процессами выполняется не в пределах определенных железных дорог, а в границах расширенных полигонов управления, объединенных решением общих задач.

Укрупнение полигонов управления перевозочным процессом — это объективное требование, определяемое изменяющимися технологическими и техническими условиями работы российских железных дорог, а также быстрым развитием средств управления. Среди таких условий — рост дальности перевозок грузов более чем в 1,5 раза по сравнению с началом 1990-х гг. с формированием грузонапряженных

направлений протяженностью 5 тыс. км и более, образование крупных полигонов электрической тяги постоянного и переменного тока, установление унифицированных норм веса грузовых поездов на направлениях большой длины (рис. 1), создание крупных баз по ремонту и реконструкции инфраструктуры и др. Современные средства управления движением поездов и эксплуатационной работой в целом сегодня не ограничивают протяженность управляемых полигонов сети.

Формирование ВП и условия его работы. Выбор границ полигонов управления представляет собой сложную, многокритериальную задачу, основные принципы решения которой были рассмотрены в работах [1, 2]. С учетом этих исследований в 2013–2014 гг. на сети ОАО «РЖД» были сформированы укрупненные полигоны управления тяговыми ресурсами во главе с центрами управления — ЦУТР [3]. Их функционирование показало эффективность расширения границ управления эксплуатацией локомотивов.

Образование на сети ОАО «РЖД» структур ЦУТР, в том числе на восточном полигоне (ЦУТР ВП), стало первым этапом внедрения полигонных технологий. В 2015 г. было принято решение о реализации пилотного проекта управления перевозочным процессом в целом на полигоне четырех железных дорог — Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской и Дальневосточной, получившим название «восточный полигон» (рис. 2). Единое управление здесь должен обеспечивать центр управления перевозками на восточном полигоне (ЦУП ВП).

Восточный полигон выбран в качестве пилотного проекта потому, что здесь в наиболее концентрированном виде (по сравнению с другими регионами сети) требуется решать различные задачи в единой увязке структурных подразделений производственного и сбытового блоков ОАО «РЖД» на всех четырех железных дорогах.

Так, восточный полигон имеет всего два внешних стыка с остальной сетью — Мариинск и Между-

■ E-mail: osminin.mikhail@vniizht.ru (М. А. Осьминин)

реченск, в то время как другие возможные полигоны управления имеют 8–20 внешних стыков. Известно [4], что одним из принципов теории управления при делении общей системы на подсистемы является наличие «слабых связей» между подсистемами и «сильных связей» внутри них. В этом случае управляемые объекты подсистем наиболее тесно связаны между собой, что делает единое управление ими наиболее эффективным. Восточный полигон в составе четырех железных дорог по критерию числа внешних стыков хорошо соответствует выделению в самостоятельную подсистему из общей системы сети ОАО «РЖД».

Важно, что на восточном полигоне электрификация выполнена на одном роде тока — переменном. Это позволяет организовать единое управление электровозным парком на протяженных направлениях. Тепловозная тяга используются на существенной части БАМ от Таксимо до Ванино и на рокадных ходах.

Следует отметить значительную долю образования внутриполигонных вагонопотоков непосредственно на станциях восточного полигона и станциях прилегающей к полигону Западно-Сибирской железной дороги, что создает благоприятные условия для управления вагонными парками в ЦУП ВП.

На рис. 3 приведена диаграмма среднесуточных вагонопотоков с выделением трех полигонов их образования — собственно восточный полигон (3), Западно-Сибирская (З-СИБ) железная дорога (2) и остальные железные дороги сети (1). Учитывая возможность на основе использования логистических методов детального управления вагонопотоками, в том числе поступающими с Западно-Сибирской железной дороги, доля вагонопотока, хорошо поддающаяся воздействию на поездообразование и продвижение поездов, составляет:

$$\lambda_{\text{ваг}} = \frac{N_{23} + N_{33} + N_{32} + N_{31}}{N_{23} + N_{33} + N_{32} + N_{31} + N_{13}}$$

N_{33} — внутреннее образование вагонопотоков на восточном полигоне.

Для современных значений рассматриваемых вагонопотоков $\lambda_{\text{ваг}} = 0,92$, что следует оценивать как исключительно благоприятные условия для организации и продвижения вагоно- и поездопотоков на восточном полигоне. Остальные обозначения понятны из рис. 3.

Возникает вопрос о возможности отнесения Западно-Сибирской железной дороги к восточному полигону. Известно, что район Кузбасса образует четыре основных грузопотока: Кузбасс — Дальний Восток, Кузбасс — Северо-Запад, Кузбасс — Юг и Кузбасс — Центр [5]. Расчеты показывают, что наибольшее тяготение грузопоток Кузбасса имеет в западном направлении, доля погрузки на котором

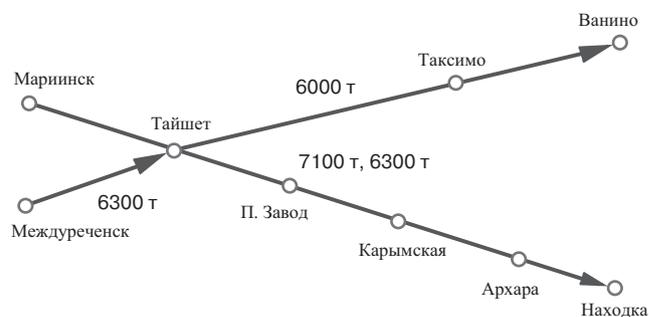


Рис. 1. Целевая модель весовых норм на восточном полигоне
Fig. 1. The target model of weight norms at the eastern operational polygon

составляет 46 %, в то время как в восточном направлении доля погрузки составляет 21 % (33 % на З-СИБ составляет погрузка «на себя»). Поэтому Западно-Сибирская железная дорога должна включаться в полигон с железными дорогами, примыкающими к ней с запада.

Восточный полигон характеризует высокая транзитность образования вагонопотоков, что определяется значительной погрузкой экспортных грузов в морские порты Дальнего Востока. В таблице для современных условий приведена матрица среднесуточных междорожных вагонопотоков железных дорог восточного полигона с учетом погрузки в Кузбассе. Подобное распределение сохраняется и на перспективу до 2025–2030 гг.

Матрица среднесуточных междорожных вагонопотоков на восточном полигоне с учетом погрузки на Западно-Сибирской железной дороге

The matrix of average daily inter-road car traffic flows at the eastern operation polygon, taking into account loading on the West Siberian Railway

С \ На	КРАСН	В-СИБ	ЗАБ	Д-ВОСТ	Всего
З-СИБ*	5 381	3 726	1 185	50 257	60 549
КРАСН*	—	4 548	2 683	13 325	20 556
В-СИБ*	800	—	9 033	22 263	32 096
ЗАБ*	79	649	—	3 684	4 412
Д-ВОСТ*	704	1 072	1 073	—	2 909
Итого:				89 529	120 522

* Названия железных дорог: З-СИБ — Западно-Сибирская, КРАСН — Красноярская, В-СИБ — Восточно-Сибирская, ЗАБ — Забайкальская, Д-ВОСТ — Дальневосточная.

Из этих данных видно, что транзитный вагонопоток в адрес Дальневосточной железной дороги составляет $89\,529/120\,522 = 0,75$ или 75 %. В этих условиях организация продвижения транзитных поездов, следующих по маршрутам большой протяженности, становится одной из главных задач диспетчерского аппарата ЦУП ВП.

Протяженность железнодорожных линий восточного полигона в целом составляет более 17 тыс. км, в то время как средняя длина линий существующих



Рис. 2. Схема железных дорог восточного полигона
 Fig. 2. Scheme of the railways of eastern operational polygon

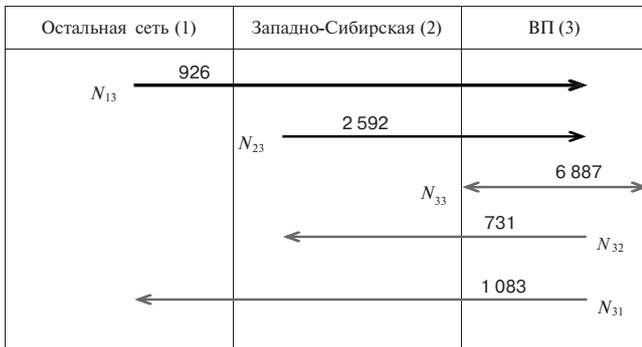


Рис. 3. Диаграмма среднесуточных вагонопотоков между ВП, Западно-Сибирской железной дорогой и остальной сетью ОАО «РЖД» (N_{33} — внутреннее образование вагонопотоков на восточном полигоне)

Fig. 3. Diagram of average daily carload flows between the Eastern Polygon, the West Siberian Railway and the rest of the network of Russian Railways (N_{33} — internal formation of car flows at the eastern range)

железных дорог (т. е. существующих региональных полигонов управления) равна 5,3 тыс. км. Отметим, что в мировой практике полигоны управления перевозками постоянно укрупняются, причем имеются диспетчерские центры, управляющие полигонами более 50 тыс. км. Так, диспетчерский центр железной дороги BNSF (США) управляет движением поездов на полигоне протяженностью 53,3 тыс. км. Здесь одновременно работают более 100 диспетчеров, в движении одновременно находятся до 2000 поездов. Поэтому решение о создании восточного полигона и ЦУП ВП следует оценить соответствующим как изменившимся-

ся условиям работы российских железных дорог, так и мировым тенденциям развития системы управления железнодорожными перевозками.

Основные положения технологического процесса ВП.

В разработке технологического процесса работы восточного полигона участвовали специалисты Центральной дирекции управления движением ОАО «РЖД» (ЦД ОАО «РЖД»), АО «ВНИИЖТ», ОАО «НИИАС».

В соответствии с разработанным технологическим процессом ЦУП ВП должен обеспечить устойчивую эксплуатационную работу всех подразделений восточного полигона, связанных с организацией и выполнением перевозочного процесса. Для этого на полигонный уровень управления передаются определенные полномочия, связанные с нормативным обеспечением и оперативной работой, ответственность за которые несли центральный и дорожный уровни управления.

График движения и план формирования поездов.

В части нормативного обеспечения это прежде всего относится к вопросам разработки графика движения и плана формирования поездов, разработки и реализации директивного плана предоставления «окон» для ремонтно-строительных работ.

ЦУП ВП определен в качестве ответственного за подготовку нормативной базы и разработку графика движения поездов, а также за его корректировку в пределах всего восточного полигона. По этим вопросам ЦУП ВП осуществляет взаимодействие с дирекциями инфраструктуры и тяги, пассажирскими служ-

бами, пригородными пассажирскими компаниями, дирекциями моторвагонного подвижного состава, территориальными подразделениями фирменного транспортного обслуживания и другими подразделениями. В то же время условия прокладки ниток пассажирских и грузовых поездов по специализированным расписаниям, с маршрутами следования, выходящими за пределы восточного полигона, определяет Центральная дирекция управления движением.

Для выполнения установленных функций в отделе графика движения поездов ЦУП ВП концентрируются технологи по разработке графика движения, а также ведущие инженеры и инженеры по тяговым расчетам, ранее находившимся на дорожном уровне.

Единая разработка графика движения, а также его корректировки на всем полигоне, несомненно, обеспечит повышение качества поездной работы.

Аналогично организуется и работа по плану формирования поездов. ЦУП ВП определяется ответственным за увеличение транзитности вагонопотоков в целом на полигоне, повышение уровня отправительской маршрутизации, за осуществление контроля выполнения плана формирования, его своевременную корректировку и др. Центральная дирекция управления движением выполняет разработку и корректировку только сетевых назначений плана формирования.

Выполнение ремонтно-строительных работ. Особое значение имеет передача в ЦУП ВП основных функций по разработке и выполнению графика предоставления «окон».

Потери участковой скорости в период предоставления «окон» на сети ОАО «РЖД» весьма существенны. В среднем на сети, в том числе и на восточном полигоне, в периоды массового предоставления «окон» участковая скорость уменьшается примерно на величину более 2 км/ч. Снижение этих потерь может быть достигнуто на основе технологии планирования и предоставления «окон» в створе на направлениях большой протяженности. Восточный полигон предоставляет для реализации такой технологии наилучшие условия. Здесь имеются два ярко выраженных направления — Транссиб и БАМ протяженностью 5578 км и 4358 км. «Окна» в створе могут предоставляться на этих направлениях на всем протяжении. При этом требуется организация работы как в светлое, так и в темное время суток. На рис. 4 представлен, например, вариант предоставления «окон» в створе от станции Юрты до станции Чита с выполнением работ в темное и светлое время суток.

Опыт практической организации ремонтно-строительных работ показывает, что важно не только правильно разработать директивный план предоставления «окон», но и организовать точное его выполнение. Сдвигка «окон» по времени по тем или иным при-

чинам нередко приводит к неоправданным значительным дополнительным задержкам поездов. Новая технология предусматривает единую ответственность ЦУП ВП не только за разработку директивного графика предоставления «окон», но и за его осуществление. При этом на дорожном уровне должна быть обеспечена координация действий всех участников выполнения работ в «окно».

Логистика перевозочного процесса. Большие полномочия получает ЦУП ВП в части логистического обеспечения перевозок [6, 7], что для восточного полигона имеет особое значение. Недостаточная координация работ по погрузке и продвижению грузо- и поездопотоков в Дальневосточные морские порты нередко приводит к значительным задержкам вагонов на станциях полигона. В отдельные периоды число задержанных от движения поездов исчисляется десятками.

Для исключения таких ситуаций полигонный отдел логистики перевозок ежедневно формирует в форме приказа ЦУП ВП план подвода поездов на припортовые станции для его выполнения всем диспетчерским аппаратом, находящимся как в ЦУП ВП, так и во всех дирекциях управления движением полигона. В этом приказе учитывается фактическое наличие груза и прогноз его продвижения, возможности морских портов и отдельных терминалов по приему и выгрузке грузов. Определяется очередность продвижения поездов и условия их отставления от движения при складывающейся неблагоприятной эксплуатационной обстановке.

Предусматривается четкое разделение функций персонала полигонного отдела логистики перевозок по решению стратегических и локальных задач.

К стратегическим относятся задачи организации погрузки и продвижения груза в адрес портов на всем восточном полигоне. Их решают выделенные специалисты отдела логистики перевозок. Локальные задачи связаны с организацией подвода груза непосредственно к морским портам. Такие задачи решают специалисты отдела с их местонахождением в Хабаровске. На рис. 5 представлен комплекс задач отдела и условия их решения во взаимодействии с органами производственного и сбытового блоков ОАО «РЖД».

Управление локомотивами. В ЦУП ВП сосредотачивается управление локомотивным парком. При этом персонал ранее созданного ЦУТР ВП полностью переходит в новую структуру. В ЦУТР ВП и в других регионах сети уже накоплен опыт управления локомотивами на полигонах нескольких железных дорог [8, 9]. Новым для восточного полигона здесь становится то, что ранее по вопросам образования транзитных поездопотоков локомотивные диспетчеры ЦУТР ВП должны были взаимодействовать с диспетчерами че-

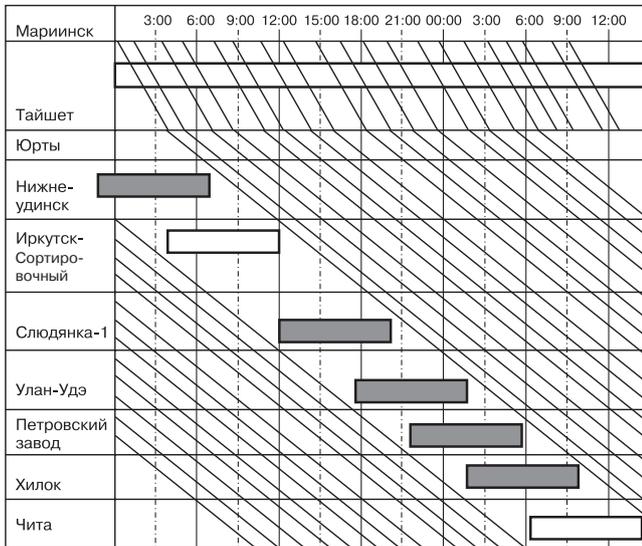


Рис. 4. Предоставление «окон» и закрытий на ВП в единые технологические створы с выполнением работ в светлое и темное время суток:

□ Светлое время суток ■ Темное время суток
 Fig. 4. Provision of "occupations" and closures at the EP in the same technological transit sections with the execution of works in the day time and the night time:
 □ Day time ■ Night time

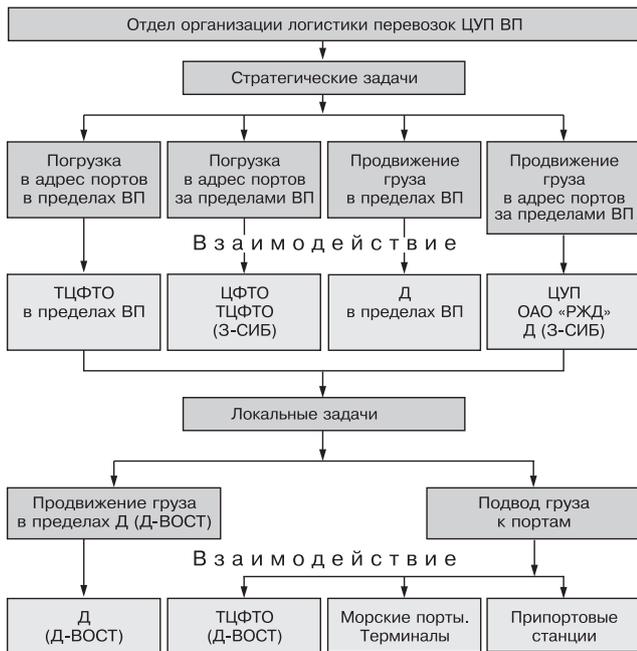


Рис. 5. Стратегические и локальные логистические задачи ЦУП ВП и взаимодействие с подразделениями производственного и сбытового блоков по их решению: Д — дирекции управления движением; ТЦФТО — территориальные центры фирменного транспортного обслуживания

Fig. 5. Strategic and local logistics tasks of the TCC EP and interaction with the production and sales departments by their decision:
 Д — Directorate of Traffic Management;
 ТЦФТО — territorial centers of branded transport service

тырех региональных центров управления движением (ДЦУП). Теперь вся эта информация концентрируется у диспетчерского аппарата ЦУП ВП, что должно существенно улучшить точность прогнозирования поездопотоков на восточном полигоне и, соответственно, повысить качество планирования оборота локомотивов на участках их обращения, имеющих длину до трех тысяч километров и более. ЦУП ВП становится также центром ответственности за повышение веса грузовых поездов, качества использования локомотивов и локомотивных бригад.

В области оперативного управления перевозочным процессом принципиальное изменение технологии заключается в полной передаче в ЦУП ВП функций разработки и контроля выполнения сменно-суточных планов эксплуатационной работы. Ранее разработку таких планов для дирекций управления движением (Д) полигона осуществлял ЦУП ОАО «РЖД». Единый полигонный сменно-суточный план оперативной работы позволит повысить координацию работы всех Д полигона, снизить уровень неравномерности поездного движения, что особенно важно для повышения ритмичности передачи поездов по междорожным стыкам полигона, которые по существу прекращают оказывать сдерживающее влияние на ход эксплуатационной работы.

Предусмотрено образование единой диспетчерской смены ЦУП ВП, в составе которой работают сменные работники по всем составляющим элементам организации эксплуатационной работы во главе со старшим диспетчером ЦУП ВП:

- диспетчеры по основным направлениям полигона — БАМ и Транссиб;
- диспетчеры по укрупненным участкам полигона, тесно взаимодействующие с поездными диспетчерами дирекций управления движением;
- локомотивные диспетчеры, взаимодействующие в том числе с диспетчерами сервисной компании ООО «ТМХ-сервис» по своевременному подводу локомотивов на техническое обслуживание и ремонт;
- сменный инженер по предоставлению «окон», взаимодействующий с центрами управления содержанием инфраструктуры (ДИ ЦУСИ);
- сменный инженер по логистике перевозок;
- сменный инженер по анализу выполнения сменно-суточных планов.

Старший диспетчер ЦУП ВП, таким образом, имеет возможность принимать комплексные решения. Такое единое управление перевозочным процессом будет способствовать лучшему выполнению установленных для ЦУП ВП количественных и качественных показателей эксплуатационной работы.

В части информационного обеспечения предусмотрено такое развитие существующих автоматизиро-

ванных информационных и информационно-управляющих систем, которое обеспечит предоставление необходимых данных и выработку управляющих решений на полигонном уровне. Опыт создания АСУ полигонного уровня имеется в части управления локомотивами и локомотивными бригадами на уровне ЦУТР ВП [10]. До подобного уровня предстоит развить и системы разработки графиков движения и плана формирования поездов, технического нормирования, разработки сменно-суточных планов, предоставления «окон» для ремонтно-строительных работ и по другим элементам перевозочного процесса.

Вывод. Разработанный технологический процесс работы ЦУП ВП является основой организации перевозочного процесса на восточном полигоне. Его основные положения должны использоваться при внедрении новой системы управления и на других полигонах сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сотников Е.А., Шенфельд К.П., Кондрахина Н.В. Основные принципы территориальной организации бизнес-единиц производственного блока ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2013. № 3. С. 10–16.
2. Сотников Е.А., Шенфельд К.П., Ивницкий В.А. Определение рационального числа управляемых структур при оперативном управлении перевозочным процессом // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 2. С. 3–5.
3. Власенский А.А. Новая структура управления тяговыми ресурсами // Железнодорожный транспорт. 2014. № 3. С. 30–35.

4. Лернер А.Я. Начала кибернетики. М.: Наука, 1967. 400 с.
5. Пехтерев Ф.С. Об основных положениях Генеральной схемы развития сети железных дорог ОАО «РЖД» на период до 2020 года // Железнодорожный транспорт. 2012. № 5. С. 4–9.
6. Валинский О.С. На основе логистических технологий // Железнодорожный транспорт. 2014. № 10. С. 28–31.
7. Голоскоков В.Н. Новые формы взаимодействия с портами юга России // Железнодорожный транспорт. 2014. № 10. С. 32–33.
8. Богач В.П. Управление тяговыми ресурсами на Урало-Сибирском полигоне // Железнодорожный транспорт. 2014. № 6. С. 32–35.
9. Управление объединенным парком электровозов железных дорог / А.С. Левченко [и др.]. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. 88 с.
10. Баранов А.Л. Управление тяговыми ресурсами на Восточном полигоне // Железнодорожный транспорт. 2014. № 4. С. 25–31.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗОБНИН Валерий Леонидович,
заместитель начальника Центральной дирекции управления движением ОАО «РЖД» (по развитию)

ОСЬМИНИН Александр Трофимович,
д-р техн. наук, профессор, заведующий отделением ПРС, АО «ВНИИЖТ»

СОТНИКОВ Евгений Александрович,
д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

ОСЬМИНИН Михаил Александрович,
ведущий инженер, отделение ПРС, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 03.03.2016 г., принята к публикации 04.05.2017 г.

Technological work process of the control center for transportation of the eastern operational polygon (TsUP VP)

V. L. ZOBNIN¹, A. T. OS'MININ², E. A. SOTNIKOV², M. A. OS'MININ²

¹ Central Directorate for Traffic Management of the JSC "Russian Railways" (JSC "RZD"), Moscow, 129090, Russia

² Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. The article considers technology of the unified control of the transportation process at the eastern operation area of the JSC "Russian Railways" network, which includes four railways: Krasnoyarsk, East Siberian, Transbaikal and Far East. This organization of operational work is a pilot project to create a polygon management in general on the network. It is shown that at the eastern area in the most concentrated form various operational tasks are solved in a unified coordination of the structural enterprises of the production and marketing units of JSC "Russian Railways" on all four railways. There are only two external junctions with other railways, the lines are electrified only by alternating current, the origin and downturn of freight flows occurs mainly within the area. The governing body of the polygon — the TCC EP (TsUP VP) was given the authority to provide regulatory support for the transportation process and to manage the operational work, the implementation of which was previously envisaged at the central and road levels. Authors show the polygon technology of the TCC EP work in the area of the traffic schedule and the train formation plan, the order of rationing and provision of "occupations" for repair and construction works, logistical support of transportation, operational

management of the transportation process, information support and evaluation of the activities of the TCC EP. The structure of management is presented. The developed technological process of the TCC EP operation should become the basis for solving practical problems in the field of the implementation of the polygon control technology for the transportation process, both at the eastern range and at other sites of the JSC "Russian Railways" network.

Keywords: technological process; eastern polygon; normative support; operational management; information support; management structure; work performances

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-146-152>

REFERENCES

1. Sotnikov E. A., Shenfel'd K. P., Kondrakhina N. V. *Osnovnye printsipy territorial'noy organizatsii biznes-edinit proizvodstvennogo bloka OAO "RZhd"* [The basic principles of the territorial organization of business units of the production unit of JSC "Russian Railways"]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2013, no. 3, pp. 10–16.
2. Sotnikov E. A., Shenfel'd K. P., Ivnit'skiy V. A. *Opreделение ratsional'nogo chisla upravlyaemykh struktur pri operativnom*

управлении перевозочным процессом [Determination of the rational number of controlled structures in the operational management of the transportation process]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2013, no. 2, pp. 3–5.

3. Vlasenskiy A. A. *Novaya struktura upravleniya tyagovymi resursami* [New structure of traction resources management]. Zheleznodorozhnyy transport, 2014, no. 3, pp. 30–35.

4. Lerner A. Ya. *Nachala kibernetiki* [The beginning of cybernetics]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 400 p.

5. Pekhterev F. S. *Ob osnovnykh polozheniyakh General'noy skhemy razvitiya seti zheleznikh dorog OAO "RZHD" na period do 2020 goda* [On the main provisions of the General Scheme for the development of the railways network of JSC "Russian Railways" for the period up to 2020]. Zheleznodorozhnyy transport, 2012, no. 5, pp. 4–9.

6. Valinskiy O. S. *Na osnove logisticheskikh tekhnologiy* [On the basis of logistical technologies]. Zheleznodorozhnyy transport, 2014, no. 10, pp. 28–31.

7. Goloskokov V. N. *Novye formy vzaimodeystviya s portami yuga Rossii* [New forms of interaction with the ports of the south of Russia]. Zheleznodorozhnyy transport, 2014, no. 10, pp. 32–33.

8. Bogach V. P. *Upravlenie tyagovymi resursami na Uralo-Sibirskom poligone* [Management of traction resources at the Ural-Siberian operational area]. Zheleznodorozhnyy transport, 2014, no. 6, pp. 32–35.

9. Levchenko A. S., Aleksandrov V. I., Kurenkov P. V., Kremnev A. A., Mitrofanov A. N. *Upravlenie ob "edinennym parkom elektrovozov zheleznikh dorog* [Management of the combined fleet of railway electric locomotives]. Moscow, GOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [GOU "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport"] Publ., 2010, 88 p.

10. Baranov A. L. *Upravlenie tyagovymi resursami na Vostochnom poligone* [Management of traction resources on the Eastern operational polygon]. Zheleznodorozhnyy transport, 2014, no. 4, pp. 25–31.

ABOUT THE AUTHORS

Valeriy L. ZOBNIN,

Deputy Head of the Central Directorate for Traffic Management of the JSC "RZD" (for Development)

Aleksander T. OS'MININ,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department PRS, JSC "VNIIZhT"

Evgeniy A. SOTNIKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, JSC "VNIIZhT"

Mikhail A. OS'MININ,

Leading Engineer, Department PRS, JSC "VNIIZhT"

Received 03.03.2016

Accepted 04.05.2017

■ E-mail: osminin.mikhail@vniizht.ru (M. A. Os'minin)

КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА

МИЛАН ВСТРЕЧАЕТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНИКОВ!

В Милане пройдет ведущая железнодорожная конференция Италии, сопровождаемая выставкой железнодорожной техники. EXPO Ferroviaria-2017 — единственное в Италии мероприятие, посвященное железнодорожной технологии, продукции и системам, будет проходить 3–5 октября в зале Rho Fiera Milano. EXPO Ferroviaria-2017 это:

- Новое пространство в Милане — деловом центре Италии.
- Более 300 участников выставки из 20 стран: от крупных промышленников до представителей малого бизнеса.
- Новая открытая площадка, посвященная демонстрации железнодорожных материалов.
- Участки пути в выставочном зале для демонстрации технологий инфраструктуры.
- 7 000 посетителей со всего света.
- 3 дня конференций, семинаров и технологических презентаций.
- Технические визиты на железнодорожные объекты в пределах Милана.

НОВИНКА!!!! Открытая демонстрация железнодорожной техники в депо Trenord Fiorenza.

Впервые в сотрудничестве с Trenord на выставке будет представлена экспозиция железнодорожной техники на открытом воздухе. Бесплатный автобус будет доставлять посетителей от экспоцентра к демонстрационной зоне. Для посещения открытой выставки необходимо предварительное бронирование и онлайн-оплата в размере 20 Евро за каждого посетителя (оплата доступна на сайте www.expoferroviaria.com).

РЕГИСТРИРУЙТЕСЬ ЗАРАНЕЕ, ЧТОБЫ ПОЛУЧИТЬ ВОЗМОЖНОСТЬ УВИДЕТЬ ЭКСПОЗИЦИЮ!

Вход на основную выставку БЕСПЛАТНЫЙ, если вы заранее зарегистрировались на www.expoferroviaria.com.

THE RAIL INDUSTRY MEETS IN MILAN!

Milan hosts the leading rail event in Italy and its outdoor rolling stock display.

EXPO Ferroviaria 2017, the only event in Italy dedicated to railway technology, products and systems will open its doors on 3–5 October at Rho Fiera Milano and will feature:

- A new venue in Milan, Italy's business hub.
- More than 300 exhibitors from 20 countries: from major international companies to SME.
- A new outdoor area dedicated to rolling stock material display.
- Track sections in the exhibition hall to display infrastructure technology.
- 7,000 visitors expected from all over the world.
- 3 days of conferences, seminars and technical presentations.
- Technical site visits to rail facilities in the Milan area.

NEW!!!! Outdoor rolling stock display at Trenord Fiorenza depot.

For the first time, in collaboration with Trenord, the show will feature an outdoor display area for rolling stock. A free shuttle bus service will operate from the exhibition to the outdoor area. Advance booking and an online payment of €20 per visitor is required on www.expoferroviaria.com.

PRE-REGISTER NOW FOR YOUR VISIT TO THE EXHIBITION!

Entrance to the show is FREE if you register in advance on www.expoferroviaria.com.

Стояночные тормозные башмаки. Эксплуатационные испытания

Д. П. МАРКОВ¹, И. Н. ВОРОНИН¹, Н. П. ШИПУЛИН², В. И. МАРШЕВ¹,
А. В. СУХОВ¹, В. В. ГУЗАНОВ², А. В. КУМИНОВ²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО ВНИИЖТ), Москва, 129626, Россия

² Центральная дирекция управления движением открытого акционерного общества «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»), Москва, 129090, Россия

Аннотация. Статья является продолжением ранее опубликованных работ о новых стояночных башмаках, разработанных АО «ВНИИЖТ» совместно с Центральной дирекцией управления движением ОАО «РЖД» и теперь уже прошедших весь комплекс необходимых испытаний. Представлены результаты подконтрольной эксплуатации установочной серии новых стояночных башмаков в приемо-отправочном парке ст. Лосиноостровская Московской железной дороги. Показано, что новые башмаки превосходят серийные по многим показателям.

Ключевые слова: стояночные тормозные башмаки; новая конструкция; установочная серия; эксплуатационные испытания

Введение. Ранее в публикациях сообщалось о начале работ по созданию нового для Российской Федерации типа тормозных железнодорожных башмаков — стояночных башмаков, предназначенных для закрепления подвижного состава на путях и обладающих рядом качеств, радикально отличающих их от применяемых в настоящее время для этой цели горочных башмаков [1, 2]. На новых башмаках предусмотрен порожек, предотвращающий скатывание колеса с башмака. Новые башмаки в 1,85 раза легче горочных и нечувствительны к небольшим перекосам при установке. Затраты на изготовление новых башмаков могут остаться прежними или даже снизиться благодаря применению для их изготовления более дешевых и доступных материалов, уменьшению толщины полоза и длины бортов (а значит и возможности применения прессов малой мощности), замене литья и клепки сваркой, снижению почти в два раза металлоемкости. Несомненно, что в перспективе новые башмаки заменят горочные во всех случаях, где требуется закрепление подвижных единиц или составов на железнодорожных путях.

Завершающий этап разработки — подконтрольная эксплуатация установочной серии на станционных путях — показал то, что новые башмаки оказались в несколько раз долговечнее используемых в настоящее время горочных и превосходят их по прочности, надежности закрепления, удобству использования, технологичности, соотношению цены и качества.

Особенности подконтрольной эксплуатации установочной серии новых башмаков. На рис. 1 показан внешний вид нового стояночного башмака установочной серии, изготовленной по откорректированным Техническим требованиям ТТ БТС-ВНИИЖТ-2016 до и после полугодовой эксплуатации.

Подконтрольная эксплуатация установочной серии проведена на путях № 2–7 приемо-отправочного парка № 1 ст. Лосиноостровская Московской железной дороги с 12 августа по 15 ноября 2016 г. Схема и фотография парка № 1 с расположением ящиков для хранения башмаков показаны на рис. 2.

Программа подконтрольной эксплуатации предусматривала сравнение партии из 50 шт. новых башмаков с таким же количеством серийных горочных, изготовленных по ТУ 32-001124324-74-94 (чертеж 8739.00СБ).

На длинных путях № 2–4 при помощи новых башмаков закреплялись в основном тяжелые грузовые составы с нефтью, металлом, строительными материалами (средняя длина путей 877 м). На коротких путях № 5–7 закреплялись в основном короткие легкие сме-



Рис. 1. Тормозной стояночный башмак установочной серии до эксплуатации (а) и после 6 месяцев интенсивной эксплуатации (б)
Fig. 1. The parking brake shoe of the pilot batch before (a) and after 6 months of intensive operation (б)

■ E-mail: markov.dmitry@vniizht.ru (Д. П. Марков)

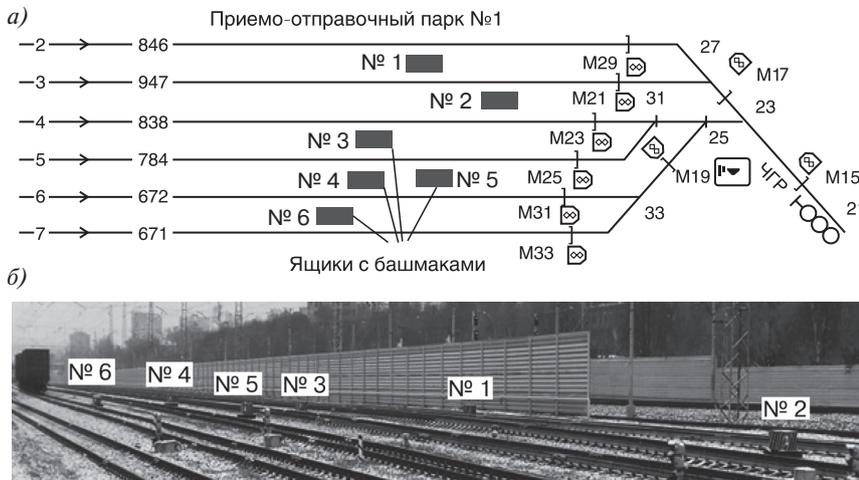


Рис. 2. Схема (а) и фотография (б) парка № 1 с расположением ящиков для хранения башмаков. Ящики № 1, 2 и 3 на 2, 3 и 4 путях — с новыми башмаками, ящики № 4, 5 и 6 на 5, 6 и 7 путях — с серийными башмаками. Слева на схеме указаны номера и длина путей. М — выходные сигналы

Fig. 2. Scheme (a) and photograph (b) of yard no. 1 with the location of storage boxes for shoes. Boxes no. 1, 2 and 3 on tracks 2, 3 and 4 with new shoes, boxes no. 4, 5 and 6 on tracks 5, 6 and 7 with serial shoes. On the left, the numbers and lengths of the tracks are indicated. M — exit signals

шанные составы (средняя длина путей 709 м). Эти пути использовались реже, чем первые три. Сведения о составах, закрепленных на путях (номер, количество вагонов и осей в составе, номера башмаков, использованных для закрепления, а также замечания по работе всех башмаков), ежедневно заносились в журналы сигналистами поста.

За время подконтрольной эксплуатации было повреждено 2 новых башмака и 18 серийных. На рис. 3 представлены данные о закрепленных составах и вагонах, количестве подложенных и поврежденных башмаков.

Повреждаемость Π башмаков в относительных единицах с учетом числа закреплений и количества закрепленных вагонов, рассчитывалась по формуле:

$$\Pi = \frac{\text{Количество поврежденных башмаков}}{\text{Количество закреплений} \times \text{Количество вагонов}} \times 1\,000\,000$$

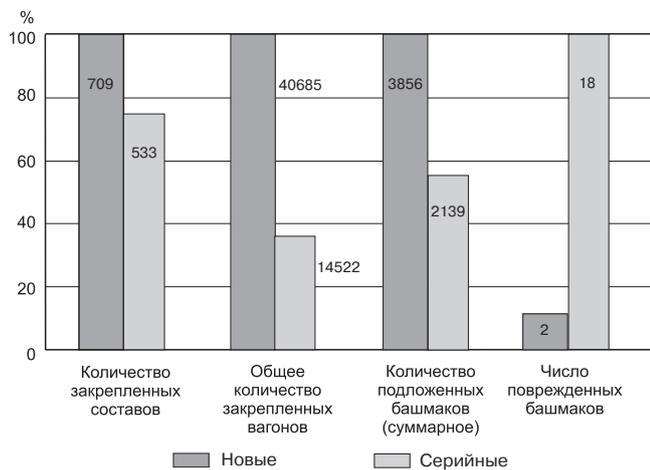


Рис. 3. Данные о количестве закрепленных составов, вагонов, подложенных и поврежденных башмаков за 3 месяца подконтрольной эксплуатации

Fig. 3. Data on the number of fixed trains, cars, laid and damaged shoes for 3 months of controlled operation

Повреждаемость новых башмаков равна $\Pi_{\text{нов}} = 0,0127$, серийных — $\Pi_{\text{сер}} = 0,579$. То есть повреждаемость новых башмаков за время подконтрольной эксплуатации оказалась в 45,6 раза меньше, чем серийных.

Причины повреждения башмаков

Новые башмаки. Новый башмак спроектирован таким образом, что при застревании его по какой-либо причине на рельсе груженный вагон сминал бы его и колесо вагона получало бы возможность спокойно перекатиться через смятый башмак. Тем самым исключается возможная вероятность схода колесной пары с рельсов при перекаtywании через башмак в кривой. Колесо легкой порожней платформы, к сожалению, перекаtywается через новый башмак, не сминая его. Это стало причиной поломки ручек двух башмаков при застревании их на стыковом соединителе (рис. 4, а, б, в).

После полугодовой эксплуатации заметного износа или смятия носков и порожков на носке полоза не наблюдалось, но на порожках четырех башмаков появились трещины и выкрашивания. Носки ползьев новых стояночных башмаков не загибались вверх, как это происходит на горочных башмаках.

Серийные башмаки. Серийные башмаки изготовлены из мягкой стали, имеющей низкий порог задиорообразования и большую разницу между силой трения покоя и трения скольжения. Высота упорной колодки серийного башмака недостаточна для предотвращения перекаtywания в условиях повышенного трения на сухих и запесоченных рельсах. Следствием этих недостатков является частое перекаtywание колес через башмаки с деформированием или изломом ручки или прерывистое скачкообразное скольжение подбашмаченных колесных пар и выбивание башмаков из-под колеса. Трение между ползцом и рельсом, в особенности у новых башмаков с маленькой номинальной площадью пятен контакта, настолько высокое, что при первом же обратном наезде

колеса на ручку башмака ручки выходили из строя по излому.

Причины повреждения серийных башмаков были следующие (рис. 5):

- перекатывание колеса вагона через башмак с изломом ручки;
- излом ручки при обратном наезде;
- выбивание башмака из-под колеса при прерывистом скольжении с последующей перекосной установкой его на рельсе;
- наезд гребня колеса на борт башмака и деформация полоза.

Еще один недостаток серийных башмаков состоит в том, что тонкие носки полозьев интенсивно деформируются с загибом кверху. При наезде колеса на такой носок башмак подпрыгивает и может сваливаться с рельса или встать с перекосом (рис. 6).

Особенности закрепления различных типов подвижного состава. Новые башмаки позволяют закреплять те же типы грузовых и пассажирских вагонов и локомотивов, которые закрепляются горочными башмаками.

Проблема возникла лишь при закреплении вагонов-рефрижераторов производства немецкого завода Dessau, переоборудованных на вагоноремонтных заводах в вагоны-термосы. При сочетании нескольких факторов (полная загрузка вагона, тонкий обод колеса, немецкий колодочный башмак) высокая ручка нового стояночного башмака попадала в прорезь нажимного башмака и не давала сбросить башмак вбок, а чека мешала сдвинуть его назад (рис. 7).

После того как высокая трубчатая ручка была заменена на низкую сплошную, проблемы закрепления вагонов-термосов и смятия ручек при обратном наезде были решены. Вертикальная составляющая силы нажатия колеса на новую ручку проходит за пределами площади опоры полоза, поэтому при обратном наезде колеса на ручку башмак не прижимается к рельсу, а опрокидывается назад и сваливается на путь. После внесения изменений в конструкцию ручки ее повреждение при обратном наезде колеса стало невозможным, а установка и снятие нового башмака при закреплении немецких вагонов-термосов вызвало не больше затруднений, чем при закреплении серийными башмаками (рис. 8).

Преимущества нового башмака. Сравнительные характеристики нового и серийного башмаков представлены в таблице.

Из таблицы видно, что новый башмак многократно превосходит серийный по всем показателям, в особенности по повреждаемости и сроку службы (срок службы оценен для экстремальных условий, в которых половина серийных башмаков повреждается за первую неделю эксплуатации).

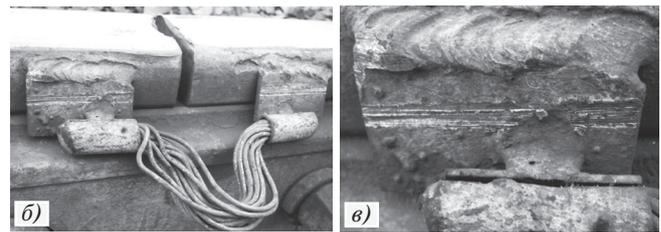


Рис. 4. Башмаки с ручками, поврежденными в результате перекатывания колеса легкой порожней платформы (а), и стыковой электросоединитель, на котором они застряли, со следами зацепления бортами башмаков (б, е)

Fig. 4. Shoes with handles damaged by the rolling of a lightweight empty platform (а), and the butt electrical connector on which they are stuck, with traces of gearing on the sides of the shoes (б, е)

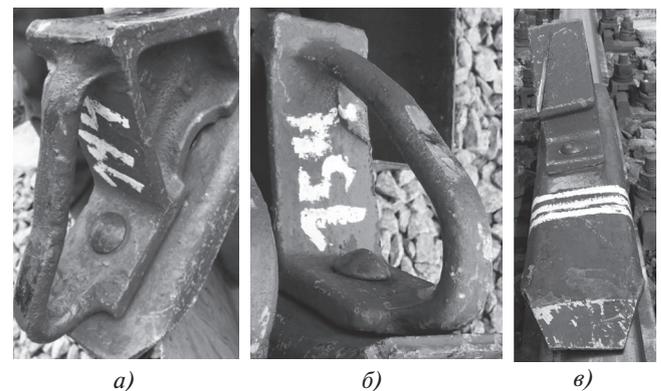


Рис. 5. Повреждения серийных башмаков: а – излом ручки при перекатывании колеса через башмак; б – излом ручки при обратном наезде; е – коробление полоза в результате перекоса башмака при прерывистом скольжении; з – деформации полоза в результате наезда гребня колеса на борт башмака

Fig. 5. Damage to the standard shoes: а – handle break when rolling the wheel through the shoe; б – fracture of the handle in the reverse collision; е – warping of the skid as a result of shoe sliding with intermittent sliding; з – deformation of the runner as a result of the collision of the wheel flange on the side of the shoe

Еще одна полезная особенность новых башмаков — возможность переноски сразу 6 и более башмаков за один раз (рис. 9), которую использовали молодые, физически развитые сигналисты для сокра-



Рис. 6. Подскок серийного башмака при наезде колеса на загнутый носок полоза, зафиксированный стоп-кадром
Fig. 6. Bounce of the serial shoe when the wheel hits the twisted skid end, caught with a stop-frame

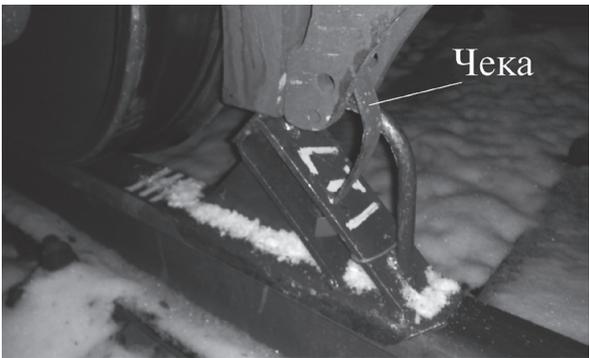


Рис. 7. Заклинивание нового стояночного башмака при закреплении рефрижераторного вагона
Fig 7. Sticking of a new parking shoe at fastening of a refrigerator car

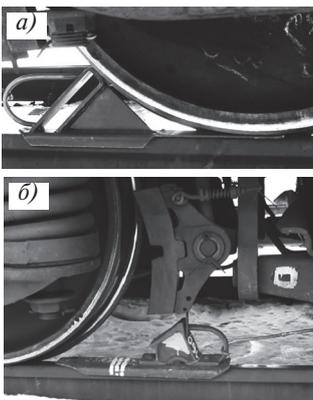


Рис. 8. Новый башмак с измененной ручкой (а) и серийный башмак (б) под вагоном-термосом с немецким нажимным башмаком и удлиненной чекой
Fig. 8. A new shoe with a modified handle (a) and a serial shoe (b) under the thermos wagon with a German pressure shoe and an elongated check. Comparative characteristics of the new and standard shoes



Рис. 9. Перенос облегченных новых башмаков
Fig. 9. Transfer of new lightweight shoes

Сравнительные характеристики нового и серийного башмаков
Comparative characteristics of the new and standard shoes

Характеристики	Серийный башмак ТУ 32-01124323-72-94	Новый башмак ТТ БТС-ВНИИЖТ-2016
Вес, кг	7,4	4,0
Высота башмака, мм	131	140
Толщина полоза, мм	8	4
Твердость, НВ	140–180	250–350
Критический коэффициент сцепления	0,34	> 0,40
Ориентировочная стоимость	750	870
Порожек против скатывания	нет	есть
Материал	Дефицитная Ст5сп	Более дешевая Ст3сп
Упорная колодка	Литая на заклепках	Сварная
Относительная повреждаемость	0,579	0,0127
Ориентировочная оценка срока службы в экстремальных условиях	14 дней	1 год

шения трудоемкости и времени закрепления длинных составов десятью и более башмаками.

Одно из существенных преимуществ нового башмака состоит в том, что он не допускает перекатывания колес через упорную колодку даже в самых экстремальных условиях, увеличивая тем самым надежность закрепления составов.

Оценка перспективы использования стояночных башмаков. Тормозные башмаки используются многие годы в различных странах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Очевидно, однако, что башмачное закрепление имеет много недостатков (малоэффективный ручной труд, малая производительность и др.). В настоящее время ведутся работы по созданию автоматизированных систем закрепления составов на станционных путях. Рассмотрим перспективы создания таких систем. Экспериментально установлено, что, если сила давления колеса на башмак превышает 3–8 тс (в зависимости от скорости накатывания), колесо 100-тонного вагона перекатывается через жестко закрепленный на рельсе горочный башмак высотой 131 мм. Удерживающая способность для колеса порожнего вагона в 2 раза меньше. Превышение этого предела приводит к перекатыванию колеса через башмак (или через упор). На рис. 10 представлен график зависимости критической удерживающей силы от высоты упора и веса вагона.

Увеличить высоту башмака или упора свыше 140 мм нельзя, поскольку на дорогах встречаются

рефрижераторные вагоны, на которых элементы тормозной системы расположены на такой высоте. Упор высотой 140 мм может создать удерживающую силу при накатывании колеса с нагрузкой 12,5 тс (100-тонный вагон с осевой нагрузкой 25 тс) до 8–10 тс; с нагрузкой 10 тс (80-тонный вагон) — до 4–6 тс. На допустимом для станционных путей уклоне 2,5 ‰ удерживающая сила для состава из 60 вагонов с осевой нагрузкой 23 тс составляет 12 тс, а при скорости надвига 5 км/ч — 15–20 тс. То есть закрепляющее устройство в виде концевого упора может удерживать на станционных путях лишь легкие составы с тяжелым вагоном в конце. Это предполагает, что на станциях отправления к составам будут предъявляться дополнительные требования к весу и расположению вагонов, что создаст дополнительные трудности для их формирования. Кардинальным решением может стать проектирование парков с короткими удерживающими тупиками, на которые переводится последний вагон закрепляемых составов. Однако это дело отдаленного будущего.

Анализ показывает, что создание автоматизированных систем закрепления составов на станционных путях является сложной, многовариантной задачей, в решении которой сделаны только первые шаги. Поэтому стояночные башмаки еще многие годы будут применяться для закрепления составов на станционных путях.

Заключение. Результаты подконтрольной эксплуатации установочной серии стояночных башмаков на станционных путях позволяют сделать следующие выводы:

1. За время подконтрольной эксплуатации было повреждено 18 серийных и 2 новых башмаков. Все серийные башмаки повреждены в условиях нормальной эксплуатации. Новые башмаки повреждены за пределами парка на стыке с наваренным соединителем.

2. Серийные башмаки повреждались по следующим причинам:

- деформация ручки вследствие перекатывания колеса через упорную колодку;
- выбивание башмака из-под колеса и перекошенная установка на рельсе с последующим наездом гребня колеса на колодку и деформация полоза в результате скачкообразного скольжения колесной пары;
- трещина в ручке в результате обратного наезда;
- наезд гребня колеса на борт и деформация полоза.

3. Эксплуатация в зимний период показала, что при обратном наезде колеса на башмак легкие и высокие трубчатые ручки нового башмака деформировались и ломались. При корректировке конструкторской документации форма и материал ручек были измене-

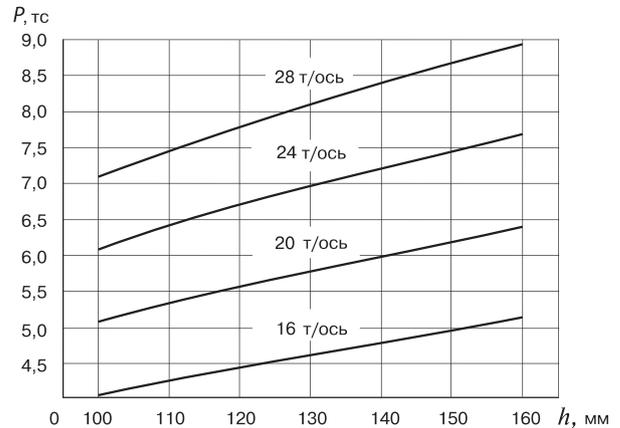


Рис. 10. Теоретическая зависимость критической удерживающей силы башмака или концевого упора P (усилие перекатывания) от его высоты h и нагрузки на ось

Fig. 10. Theoretical dependence of the critical holding force of the shoe or end stop P (the rolling force) on its height h and the load on the axis

ны: высокие трубчатые ручки заменили сплошными низкими.

4. В экстремальных условиях эксплуатации стойкость новых стояночных башмаков в десятки раз превосходит стойкость серийных горочных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушко М.И., Фёдоров Е.В. Закрепление вагонов автономными средствами // Вагоны и вагонное хозяйство. 2012. № 3. С. 36–37.
2. Образцов В.Н. Станции и узлы. М.: Трансжелдориздат, 1938. 492 с.
3. Несветова Е.А. Технические средства обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. 104 с.
4. Железнодорожные станции и узлы / В.И. Апатцев [и др.]. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. 855 с.
5. Get a grip on your freight cars // Railway Age. 2009. № 7. P. 35.
6. Rawie. Neuartiger Radvorleger // Der Eisenbahningenieur. 2005. № 11. S. 114.
7. Альбом типовых тормозных башмаков широкой и узкой колеи и приспособлений для их установки и сбрасывания / Главное управление движения МПС, ПКБ ЦП. М., 1959. 31 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

МАРКОВ Дмитрий Петрович,
д-р техн. наук, главный научный сотрудник,
АО «ВНИИЖТ»

ВОРОНИН Игорь Николаевич,
заведующий лабораторией «Тормозные системы
и фрикционные материалы подвижного состава»,
АО «ВНИИЖТ»

ШИПУЛИН Николай Павлович,
главный инженер, Центральная дирекция управления
движением, ОАО «РЖД»

МАРШЕВ Владимир Иванович,
канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
АО «ВНИИЖТ»

СУХОВ Алексей Владимирович,
канд. техн. наук, заведующий отделением
«Транспортное материаловедение», АО «ВНИИЖТ»

ГУЗАНОВ Валерий Васильевич,
начальник технического отдела службы технической

политики, Центральная дирекция управления движением,
ОАО «РЖД»

КУМИНОВ Алексей Владимирович,
заместитель начальника технического отдела
службы технической политики, Центральная дирекция
управления движением, ОАО «РЖД»

Статья поступила в редакцию 15.03.2017 г., принята к публикации
19.05.2017 г.

Parking brake shoes. Operational tests

D. P. MARKOV¹, I. N. VORONIN¹, N. P. SHIPULIN², V. I. MARSHEV¹, A. V. SUKHOV¹, V. V. GUZANOV², A. V. KUMINOV²

¹ Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

² Central Directorate for Traffic Management of the JSC "Russian Railways" (JSC "RZD"), Moscow, 129090, Russia

Abstract. The article is a continuation of previously published works on new parking shoes, developed by scientists of the JSC "VNIIZhT" jointly with specialists of the Central Directorate of Traffic Management of the JSC "Russian Railways", now have been already passed all the necessary tests. Features and results of the controlled performance of the pilot batch of new parking shoes are analyzed in the receiving-departure yard of the Losinoostrovskaya station of the Moscow railway. The results of the tests exceeded all expectations. During the period of 3 months of controlled operation, claims were brought only to the design of the valve; the design of the valve was changed when the product was refined. After semi-annual operation, excessively firm steps against the rolling down began to crack, which, however, did not affect the performance of the shoes. In the harshest conditions, no rolling of the car wheels through new shoes was recorded. Ordinary operational damages in the form of skate twists, toe buckling, deformation and separation of the sides were not observed. Damage to new shoes, taking into account the number of fastenings and the number of fixed cars during the time of controlled operation, was 45.6 times less compared to the standard shoes. It is concluded that the new shoes considerably overweigh the serial ones for all technological and operational parameters (weight, strength, reliability of fastening, ease of use, manufacturability, price/quality ratio). At present, the new shoe is fully ready for mass production.

Keywords: parking brake shoes; new design; pilot batch; operational tests

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-153-158>

REFERENCES

1. Glushko M. I., Fedorov E. V. *Zakreplenie vagonov avtonomnymi sredstvami* [Fastening of cars with autonomous means]. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo*, 2012, no. 3, pp. 36–37.
2. Obraztsov V. N. *Stantsii i uzly* [Stations and junctions]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1938, 492 p.
3. Nesvetova E. A. *Tekhnicheskie sredstva obespecheniya bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte* [Technical means of ensuring safety in railway transport]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2015, 104 p.

4. Apattsev V. I., Efimenko Yu. I. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [Railway stations and junctions]. FGBOU Publ., 2014, 855 p.

5. *Get a grip on your freight cars*. *Railway Age*, 2009, no. 7, p. 35.

6. *Rawie. Neuartiger Radvorleger*. *Der Eisenbahningenieur*, 2005, no. 11, p. 114.

7. *Al'bom tipovykh tormoznykh bashmakov shirokoy i uzkoj kolei i prisposobleniy dlya ikh ustanovki i sbrasyvaniya* [An album of typical brake shoes of wide and narrow gauge and devices for their installation and dropping]. Moscow, Glavnoe upravlenie dvizheniya MPS [Main Directorate of the Ministry of Railways], sostavitel' PKB TsP [Compiler of the PKB Central Committee], 1959, 31 p.

ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy P. MARKOV,
Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, JSC "VNIIZhT"

Igor' N. VORONIN,
Head of the laboratory "Brake systems and friction materials of the rolling stock", JSC "VNIIZhT"

Nikolay P. SHIPULIN,
Chief Engineering Officer, the Central Directorate for Traffic Management of JSC "Russian Railways"

Vladimir I. MARSHEV,
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, JSC "VNIIZhT"

Aleksey V. SUKHOV,
Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department "Transport materials science", JSC "VNIIZhT"

Valeriy V. GUZANOV,
Director of Technical department of the Technical policy Department, the Central Directorate for Traffic Management of JSC "Russian Railways"

Aleksey V. KUMINOV,
Deputy Director of Technical department of the Technical policy Department, the Central Directorate for Traffic Management of JSC "Russian Railways"

Received 15.03.2017

Accepted 19.05.2017

■ E-mail: markov.dmitry@vniizht.ru (D. P. Markov)

Визуализация изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог

А. Н. КИРЕЕВ^{1, 2}

¹ Публичное акционерное общество «Лугансктепловоз», Луганск, 91005, Украина

² Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», Луганск, 91034, Украина

Аннотация. В статье поставлена задача визуализации изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог эхо-импульсным методом одноканальным ультразвуковым дефектоскопом с применением различных методов дефектометрии. Визуализация дефектов осуществляется путем представления изображений дефектов на развертках типа В и С в автоматизированных и механизированных системах ультразвукового контроля. Представлен математический аппарат и алгоритм определения типа дефекта двухчастотным методом. Рассмотрены различные методы дефектометрии, на основе которых разработан программный продукт визуализации изображений дефектов NDTRT-14 при ручном ультразвуковом контроле элементов подвижного состава железных дорог. Представленный программный продукт успешно внедрен в технологический процесс ультразвукового контроля элементов экипажной части магистральных тепловозов в Публичном акционерном обществе «Лугансктепловоз».

Ключевые слова: неразрушающий контроль; ультразвуковой контроль; эхо-импульсный метод; дефектометрия; двухчастотный метод; визуализация

Введение. Методы неразрушающего контроля [1, 2, 3, 4] получили широкое распространение в различных отраслях народного хозяйства. Особое значение имеет их применение при изготовлении деталей и узлов подвижного состава железных дорог, поскольку методы неразрушающего контроля позволяют, не нарушая пригодности объекта к дальнейшему применению, производить 100% контроль показателей качества и надежности, непосредственно влияющих на безопасность движения.

Методы неразрушающего контроля используются как при проверке геометрических размеров изделий, так и при контроле структурных и физико-механических свойств материалов. Однако наибольшее распространение они получили при контроле элементов и систем подвижного состава на отсутствие недопустимых несплошностей (дефектов).

Анализ проблемы и постановка задачи. При контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог на отсутствие поверхностных и подповерхностных дефектов наибольшее распространение по-

лучили такие виды неразрушающего контроля, как визуально-оптический, магнитный, вихретоковый, капиллярный, электрический.

Для контроля деталей и узлов подвижного состава на отсутствие внутренних дефектов применяются радиационный и акустический виды неразрушающего контроля.

Использование радиационного неразрушающего контроля ограничено сравнительно малой толщиной контролируемых изделий, большими габаритами контрольной аппаратуры, необходимостью обеспечения защиты персонала от вредного воздействия ионизирующего излучения.

Для контроля деталей и узлов подвижного состава железных дорог на отсутствие внутренних дефектов преимущественно применяются акустические методы неразрушающего контроля.

Акустические методы неразрушающего контроля [5, 6, 7, 8] основаны на использовании упругих колебаний и волн, возбуждаемых или возникающих в контролируемом объекте. Известно множество акустических методов контроля, каждый из которых имеет свою область применения. Наиболее распространенным методом акустического неразрушающего контроля на отсутствие внутренних дефектов в металлических объектах является ультразвуковой эхо-импульсный метод.

Цель научного исследования — разработка способа визуализации изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог эхо-импульсным методом.

Визуализация изображений дефектов. Основная часть. При ручном ультразвуковом контроле эхо-импульсным методом используются одноканальные импульсные дефектоскопы [9] (рис. 1). Представление информации о наличии в объекте контроля дефектов осуществляется путем представления эхо-сигналов на развертке типа А, на которой по вертикали отображается амплитудная характеристика эхо-сигнала, а по горизонтали — расстояние до отражателя или время прихода акустического импульса (А-скан).

■ E-mail: lifter_23@mail.ru (А. Н. Киреев)



Рис. 1. Ультразвуковые импульсные дефектоскопы (слева направо): УД 4-76, УД 3-71, УД 2-70
 Fig 1. Ultrasonic pulse flaw detectors (from left to right): UD 4-76, UD 3-71, UD 2-70

Классификация несплошности как допустимой или как дефекта осуществляется путем сравнения амплитудной характеристики эхо-сигнала от несплошности с амплитудной характеристикой эхо-сигнала от эталонного отражателя в стандартном образце. Однако применение А-скана не позволяет получить информацию о форме и размерах обнаруженной несплошности.

Для повышения информативности результатов ультразвукового контроля используются методы визуализации дефектов с применением разверток типа В (В-скан) и С (С-скан). Развертка типа В — изображение несплошностей в поперечном сечении объекта контроля, перпендикулярном поверхности ввода ультразвуковой волны и параллельном направлению распространения ультразвуковой волны. Развертка типа С — отображение проекции контролируемого объема изделия на поверхность ввода ультразвуковой волны в некотором масштабе.

Для построения В- и С-сканов необходимо использование многоканальных дефектоскопов с применением нескольких преобразователей, сканирующих с разных плоскостей, или дополнительных устройств, таких как датчик перемещения.

Однако применение многоканальных дефектоскопов возможно только в автоматизированных или механизированных системах неразрушающего контроля, а использование датчика перемещения ограничено возможностью сканирования поверхности контроля только по прямой к датчику, и с его помощью возможно построение только В-скана, что не дает полной информации о форме и размере дефекта.

Для визуализации изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле при применении одноканальных ультразвуковых дефектоскопов целесообразно применение методов ультразвуковой дефектометрии — получения информации о форме и размерах дефекта.

В работах [10, 11, 12, 13] предлагается двухчастотный метод дефектометрии, позволяющий определить тип (форму) как точечного, так и протяженного дефекта —

объемный или плоскостной, при ручном ультразвуковом контроле.

Метод основан на измерении амплитудной характеристики эхо-сигналов от дефекта на частотах ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц и амплитудных характеристик донных эхо-сигналов на тех же частотах, расчете коэффициента формы дефекта и сравнении его с граничными значениями, одно из которых соответствует идеально объемному дефекту, другое — идеально плоскостному.

Коэффициент формы дефекта определяется из выражения:

$$v = N_{\text{деф}2,5} - N_{\text{деф}5,0} + N_{\text{д}5,0} - N_{\text{д}2,5}, \quad (1)$$

где $N_{\text{деф}2,5}$, $N_{\text{деф}5,0}$ — амплитудные характеристики эхо-сигналов от дефекта на частотах ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц соответственно, дБ; $N_{\text{д}2,5}$, $N_{\text{д}5,0}$ — амплитудные характеристики донных эхо-сигналов на частотах ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц соответственно, дБ.

Граничное значение для идеального точечного плоскостного дефекта (модель дефекта — плоскодонный цилиндрический отражатель) определяется из выражения (2):

$$v_{\text{пл.т.}} = 20 \lg \left(\frac{\lambda_{5,0}^2 \cdot S_{a2,5}}{\lambda_{2,5}^2 \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2,5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}} \right)^{\frac{x}{x_d}} \right), \quad (2)$$

где $\lambda_{2,5}$, $\lambda_{5,0}$ — длина ультразвуковой волны на частоте 2,5 и 5,0 МГц соответственно, мм; $S_{a2,5}$, $S_{a5,0}$ — площадь пьезоэлектрического преобразователя с частотой 2,5 и 5,0 МГц соответственно, мм²; x — расстояние от поверхности ввода ультразвука до дефекта, мм; x_d — расстояние от поверхности ввода ультразвука до донной поверхности, мм.

Граничное значение для идеального точечного объемного дефекта (модель дефекта — полусферический отражатель) определяется из выражения:

$$v_{об.т.} = 20lg \left(\frac{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}{\lambda_{2,5} \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2,5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}} \right)^{\frac{x}{x_a}} \right). \quad (3)$$

Граничное значение для идеального протяженного плоскостного дефекта (модель дефекта — паз с плоским дном) определяется из выражения:

$$v_{пл.пр.} = 20lg \left(\frac{\sqrt{\lambda_{5,0}^3 \cdot S_{a2,5}}}{\sqrt{\lambda_{2,5}^3 \cdot S_{a5,0}}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2,5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}} \right)^{\frac{x}{x_a}} \right). \quad (4)$$

Граничное значение для идеального протяженного объемного дефекта (модель дефекта — боковой цилиндрический отражатель) определяется из выражения:

$$v_{об.пр.} = 20lg \left(\frac{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}{\lambda_{2,5} \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2,5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}} \right)^{\frac{x}{x_a}} \right). \quad (5)$$

При определении типа дефекта устанавливается доверительный интервал между значением коэффициента формы и граничными значениями объемных и плоскостных дефектов, равный 30 %, т. е.:

дефект считается плоскостным, если выполняется условие:

$$v \leq \text{ГПД} + 0,3|\text{ГОД} - \text{ГПД}|, \quad (6)$$

где ГПД — граничное значение плоскостного дефекта, для точечного дефекта — $v_{пл.т.}$, для протяженного дефекта — $v_{пл.пр.}$; ГОД — граничное значение объемного дефекта, для точечного дефекта — $v_{об.т.}$, для протяженного дефекта — $v_{об.пр.}$;

дефект считается объемным, если выполняется условие:

$$v \geq \text{ГОД} - 0,3|\text{ГОД} - \text{ГПД}|; \quad (7)$$

в противном случае дефект не является плоскостным, однако и не является идеально объемным.

В работах [11, 14] предложен метод определения эквивалентных размеров дефектов различного типа. Эквивалентный диаметр точечного плоскостного дефекта:

$$d_{пл.т.} = \frac{2\lambda x 10^{N/40}}{\left(\frac{2\lambda x_d 10^{N_d/20}}{S_a} \right)^{\frac{x}{2x_a}} \sqrt{S_a \pi}}, \quad (8)$$

где λ — длина ультразвуковой волны, мм; N — амплитудная характеристика эхо-сигнала от дефекта, дБ; N_d — амплитудная характеристика донного эхо-сигнала, дБ; S_a — площадь пьезоэлектрического преобразователя, мм².

Эквивалентный диаметр точечного объемного дефекта:

$$d_{об.т.} = \frac{4\lambda x^2 10^{N/20}}{S_a \cdot \left(\frac{2\lambda x_d 10^{N_d/20}}{S_a} \right)^{\frac{x}{x_a}} - 2\lambda x 10^{N/20}}. \quad (9)$$

Эквивалентный поперечный размер протяженного плоскостного дефекта:

$$L_{пр.пл.} = \frac{10^{N/20} \sqrt{2(\lambda x)^3}}{S_a \cdot \left(\frac{2\lambda x_d 10^{N_d/20}}{S_a} \right)^{\frac{x}{x_a}}}. \quad (10)$$

Эквивалентный поперечный размер протяженного объемного дефекта:

$$d_{пр.об.} = \frac{8x^3 \lambda^2 10^{N/10}}{S_a^2 \cdot \left(\frac{2\lambda x_d 10^{N_d/20}}{S_a} \right)^{\frac{2x}{x_a}} - 4x^2 \lambda^2 10^{N/10}}. \quad (11)$$

Представленные методы дефектометрии позволяют определить тип обнаруженного в процессе ультразвукового контроля эхо-импульсным методом несплошности, и по результатам определения типа рассчитать эквивалентный размер соответствующего дефекта.

Для визуализации изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле деталей и узлов эхо-импульсным методом был разработан программный продукт NDTRT-14, позволяющий получить В- и С-сканы контролируемого участка объекта. Окна программного продукта NDTRT-14 представлены на рис. 2, 3, 4. Сначала одним из известных методов определяется тип дефекта, затем с помощью программного продукта производится его визуализация с определением эквивалентного размера дефекта. Метод определения эквивалентного размера дефекта интегрирован в программный продукт.

Визуализация изображений дефектов посредством представления В- и С-сканов контролируемого участка объекта контроля при помощи программного продукта NDTRT-14 осуществляется следующим образом:

- в окно «Ввод данных» поступают данные: координаты контролируемого участка изделия; диаметр пьезоэлектрического преобразователя; частота ультразвуковой волны; скорость ультразвуковой волны в объекте контроля; расстояние от поверхности ввода ультразвуковой волны до донной поверхности; расстояния от поверхности ввода ультразвуковой волны до дефектов; амплитудная характеристика донного эхо-сигнала на бездефектном участке объекта контроля; амплитудные характеристики эхо-сигналов от дефектов; координаты дефектов;



Рис. 2. Стартовое окно программного продукта NDTRT-14
Fig. 2. The start window of the software product NDTRT-14

руженного в процессе ручного ультразвукового контроля эхо-импульсным методом дефекта.

4. Разработан программный продукт NDTRT-14, позволяющий с применением методов дефектометрии получить визуальное изображение дефектов посредством представления В- и С-сканов контролируемого участка объекта контроля при ручном ультразвуковом контроле одноканальным дефектоскопом эхо-импульсным методом.

5. Представленные методы дефектометрии и программный продукт могут применяться при ультразвуковом контроле деталей экипажной части подвижного состава, имеющих плоскопараллельные поверхности ввода ультразвука и донную поверхность, например: бандажей колесных пар тягового подвижного состава

Координаты контролируемого участка					
верх					
Координата Z	0	110	220	330	440
Координата Y	45	67	75	67	45
низ					
Координата Z	0	110	220	330	440
Координата Y	0	22	30	22	0
лево					
Координата Z	0	0	0	0	0
Координата Y	0	11,25	22,5	11,25	45
право					
Координата Z	440	440	440	440	440
Координата Y	0	11,25	22,5	11,25	45

Параметры ПЭП		
Диаметр ПЭП d, мм	12	Sa, мм² 113,0973
Частота УЗ волны f, Гц	2500000	

Параметры ОК	
Скорость УЗ волны в ОК, мм/с	5850000
Длина УЗ волны λ, мм	2,34

Измеренные характеристики	
Расстояние до донной пов-ти Хд, мм	110
Амплитуда донного эхо-сигнала Nd, дБ	-25

Параметры обнаруженных несплошностей						
Точечные несплошности						
Плоскостная несплошность						
Изм. хар-ки		Расч. данные		Координаты		
N, дБ	-32	Экв. размер Dпл, мм		Zн, мм		120
X, мм	70	Экв. размер Dоб, мм	4,249591377	Yн, мм		30
Объемная несплошность						
Изм. хар-ки		Расч. данные		Координаты		
N, дБ	-38	Экв. размер Dоб, мм		Zн, мм		350
X, мм	55	Экв. размер Dоб, мм	6,603507915	Yн, мм		39
Протяженные несплошности						
Плоскостная несплошность						
Амплитуда N, дБ	-16	-15	-17	-14	-15	-16
Расстояние до неспл. X, мм	60,5	61	61	60,5	60,5	61
Zн, мм	10	20	30	40	50	60
Yн, мм	20	22	24	26	28	30
Экв. попер. размер Lb, мм	7,063453	8,07363	6,413112	8,892361	7,925325	7,19563
Y1	23,53173	26,03681	27,20656	30,44618	31,96266	33,59782
Y2	16,46827	17,96319	20,79344	21,55382	24,03734	26,40218
Объемная несплошность						
Амплитуда N, дБ	-16	-16,5	-16	-16,5	-16	-16
Расстояние до неспл. X, мм	35	35	35,5	35,5	35	35,5
Zн, мм	160	170	180	190	200	210
Yн, мм	50	48	46	46	46	48
Экв. попер. размер D, мм	10,03749	8,808567	10,66804	9,355042	10,03749	10,66804
Y1	55,01875	52,40428	51,33402	50,67752	51,01875	53,33402
Y2	44,98125	43,59572	40,66598	41,32248	40,98125	42,66598

Рис. 3. Окно «Ввод данных» программного продукта NDTRT-14
Fig. 3. The "Data Entry" window of the software product NDTRT-14

• в окне «Визуализация» выводятся С- и В-сканы контролируемого участка изделия. Красным цветом обозначается точечный плоскостной дефект, голубым — точечный объемный дефект, зеленым — протяженный объемный дефект и лиловым — протяженный плоскостной дефект.

Выводы. 1. Показано, что для визуализации изображений дефектов при ультразвуковом контроле эхо-импульсным методом необходимо построение В- и С-сканов контролируемого участка объекта.

2. Построение В- и С-сканов при ручном ультразвуковом контроле одноканальным ультразвуковым дефектоскопом не представляется возможным.

3. Рассмотрены методы дефектометрии, позволяющие определить тип и эквивалентный размер обнаруженного

(контроль основного сечения с внутренней боковой поверхности), цельнокатаные колеса вагонов и локомотивов (контроль обода и ступицы в осевом направлении), катаные колесные центры тягового подвижного состава (контроль обода и ступицы в осевом направлении), заготовки ведомых и ведущих зубчатых колес тягового редуктора (контроль в осевом направлении) и др.

6. Экспериментальные исследования достоверности предложенного метода визуализации рассмотрены в работе [11].

7. Ультразвуковой контроль деталей и узлов подвижного состава железных дорог осуществляет персонал, сертифицированный на 1, 2 и 3 уровни квалификации. Заключение по результатам контроля выдает персонал, сертифицированный на 2 и 3 уровни ква-

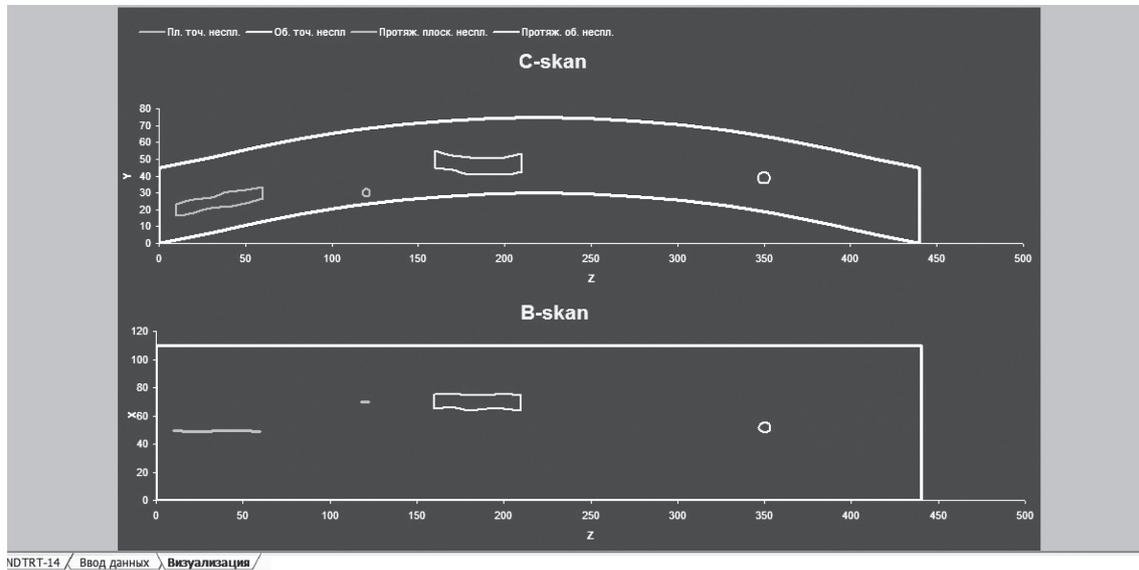


Рис. 4. Окно «Визуализация» программного продукта NDTRT-14
 Fig. 4. Window "Visualization" of the software product NDTRT-14

лификации. При необходимости к официальному заключению по результатам контроля прикладываются С- и В-сканы дефектного участка, полученные с помощью программного продукта.

8. Разработанный программный продукт NDTRT-14 внедрен в технологический процесс ультразвукового контроля деталей экипажной части магистральных тепловозов в Публичном акционерном обществе «Лугансктепловоз».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов И.Н., Останин Ю.Д. Методы и средства неразрушающего контроля качества. М.: Высшая школа, 1988. 368 с.
2. Каневский И.М., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие. Владивосток. ДВГУ, 2007. 243 с.
3. ГОСТ Р 56542–2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: Стандартинформ, 2015. 11 с.
4. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник. Изд. 2-е перераб. и доп. / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
5. Методы акустического контроля металлов / Н.П. Алешин [и др.]. М.: Машиностроение, 1989. 456 с.
6. Kireev A. Analysis of the ultrasonic control system at making of elements and knots of rolling stock of railways // ТЕКА. Commission of Motorization and Power Industry in agriculture. Lublin – Lugansk, 2010. Vol. 10С. P. 110–115.
7. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: справочник / пер. с нем. Е.К. Бухман, Л.С. Зенковой; под ред. В.Н. Волченко. М.: Металлургия, 1991. 752 с.
8. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела: пер. с англ. М.: Наука, 1972. 340 с.

9. Троицкий В.А. Ультразвуковой контроль. Дефектоскопы, нормативные документы, стандарты по УЗК. Киев: Феникс, 2006. 224 с.

10. Kireev A., Kirichenko I. Perfection of methods of determination of type of defect at the ultrasonic control of elements of rolling stock of railways // ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin – Lugansk, 2012. Vol. 12. № 3. P. 58–61.

11. Киреев А.Н. Дефектометрия при ультразвуковом диагностировании элементов и систем подвижного состава железных дорог. Монография. Луганск: Ноулидж, 2016. 147 с.

12. Киреев А.Н. Дефектометрия при ручном контроле элементов и систем подвижного состава железных дорог ультразвуковым эхо-методом // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 2 (58). С. 24–30.

13. Киреев А.Н. Экспериментальные исследования метода дефектоскопии при ручном ультразвуковом контроле элементов подвижного состава железных дорог // В мире НК. 2015. Т. 18. № 4. С. 72–75.

14. Киреев А.Н. Метод определения эквивалентного размера несплошности при ультразвуковом диагностировании элементов и систем подвижного состава железных дорог // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 4 (60). С. 14–21.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

КИРЕЕВ Андрей Николаевич,

канд. техн. наук, начальник центральной заводской лаборатории ПАО «Лугансктепловоз»; доцент кафедры железнодорожного транспорта ГОУ ВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля»

Статья поступила в редакцию 13.01.2017 г., актуализирована 27.04.2017 г., принята к публикации 11.05.2017 г.

Visualization of defects images during manual ultrasonic inspection of parts and units of the railway rolling stock

A. N. KIREEV^{1,2}

¹ Public Joint Stock Company "Luganskteplovoy", Lugansk, 91005, Ukraine

² State institution of higher professional education "Luhansk National University n.a. Vladimir Dal'", Lugansk, 91034, Ukraine

Abstract. The article suggests a method for visualizing internal defects of parts and units of rolling stock, which is performed by representing defects images on type B and C scans in automated and mechanized ultrasonic testing systems. Methods of defectometry for manual ultrasonic testing by the echo impulse method are considered. Author presents the mathematical apparatus and the algorithm for determining the defect type by a two-frequency defectometry method. A mathematical apparatus and an algorithm are proposed for determining the equivalent sizes of defects of various types, such as point volume and planar defects and extended volume and planar defects. First, the types of defects are determined by a two-frequency method, then using the obtained data and mathematical transformations they are formed and displayed in the output window of the B- and C-scans of the monitored section.

Work on the formation of the image of defects is carried out automatically with the help of the NDTRT-14 software developed by the author. The presented methods of defectometry and the software product can be used for ultrasonic inspection of the parts of the carriage section of the rolling stock having a plane-parallel ultrasonic input surface and the bottom surface – treads of wheelsets of the traction rolling stock (control of the main section from the inner side surface), solid-rolled wheels of cars and locomotives (wheels' rim and hub control in the axial direction), rolled wheel centers of traction rolling stock (wheels' rim and hub control in the axial direction), preforms of the driven and driving gears of the traction reducer (control in the axial direction). The software product was successfully introduced into the technological process of ultrasonic control of the elements of the carriage section of the mainline diesel locomotives in the Public Joint Stock Company "Luganskteplovoy".

Keywords: non-destructive control; ultrasonic control; echo impulse method; defectometry; two-frequency method; visualization

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-159-164>

REFERENCES

1. Ermolov I. N., Ostanin Yu. D. *Metody i sredstva nerazrushayushhego kontrolya kachestva* [Methods and means of non-destructive quality control]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, 368 p.
2. Kanevskiy I. M., Sal'nikova E. N. *Nerazrushayushchie metody kontrolya: uchebnoe posobie* [Nondestructive testing methods: Textbook]. Vladivostok, DVGU Publ., 2007, 243 p.
3. GOST R 56542–2015. *Non-destructive testing. Classification of types and methods*. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 11 p. (in Russ.).
4. Klyuev V. V. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika: spravochnik*. Izd. 2-e pererab. i dop. [Nondestructive testing and diagnostics: a reference book. Ed. 2-nd revised and enlarged]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 656 p.
5. Aleshin N. P., Belyy V. E., Vopilkin A. Kh., Voshchanov A. K., Ermolov I. N., Gurvich A. K. *Metody akusticheskogo kontrolya*

metallov [Methods of acoustic control of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 456 p.

6. Kireev A. N. *Analysis of the ultrasonic control system at making of elements and knots of rolling stock of railways*. TEKA. Commission of Motorization and Power Industry in agriculture. Lublin – Lugansk, 2010, Vol. 10, pp. 110–115.

7. Volchenko V. N., Krautkremer Y., Krautkremer G. *Ul'trazvukovoy kontrol' materialov: spravochnik* [Ultrasonic inspection of materials. Reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991, 752 p.

8. Truell R., El'baum Ch., Chik B. *Ul'trazvukovye metody v fizike tverdogo tela* [Ultrasonic methods in solid state physics]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 340 p.

9. Troitskiy V. A. *Ul'trazvukovoy kontrol'. Defektoskopy, normativnye dokumenty, standarty po UZK* [Ultrasonic inspection. Defectoscopes, normative documents, UZK standards]. Kiev, Feniks Publ., 2006, 224 p.

10. Kireev A., Kirichenko I. *Perfection of methods of determination of type of defect at the ultrasonic control of elements of rolling stock of railways*. TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin – Lugansk, 2012, Vol. 12, no. 3, pp. 58–61.

11. Kireev A. N. *Defektometriya pri ul'trazvukovom diagnostirovani elementov i sistem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [Defectometry in the ultrasonic diagnosis of elements and systems of rolling stock of railways]. Lugansk, Knowledge Publ., 2016, 147 p.

12. Kireev A. N. *Defektometriya pri ruchnom kontrole elementov i sistem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog ul'trazvukovym ekho-metodom* [Defectometry with manual control of railway rolling stock elements and systems by ultrasonic echo method]. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, 2015, no. 2 (58), pp. 24–30.

13. Kireev A. N. *Eksperimental'nye issledovaniya metoda defektoskopii pri ruchnom ul'trazvukovom kontrole elementov i sistem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [Experimental researches of a method of flaw detection at manual ultrasonic control of elements of railway rolling stock]. V mire NK, 2015, Vol. 18, no. 4, pp. 72–75.

14. Kireev A. N. *Metod opredeleniya ekvivalentnogo razmera nesploshnosti pri ul'trazvukovom diagnostirovani elementov i sistem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [Method for determining the equivalent size of the discontinuity in the ultrasonic diagnosis of elements and systems of railroad rolling stock]. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, 2015, no. 4 (60), pp. 14–21.

ABOUT THE AUTHOR

Andrey N. KIREEV,

Cand. Sci. (Eng.), Head of Central Factory Laboratory of PJSC "Luganskteplovoy"; Associate Professor of the Department of Railway Transport of GOU VPO "Lugansk National University n.a. Vladimir Dal'"

Received 13.01.2017

Revised 27.04.2017

Accepted 11.05.2017

■ E-mail: lifter_23@mail.ru (A. N. Kireev)

Определение возможности увеличения межремонтных нормативов вагонов-хопперов (цементовозов)

С. В. ПЕТРОВ¹, Г. В. РАЙКОВ¹, А. В. ВАСИЛЬЕВ¹, С. Е. ГОНЧАРОВ², А. Н. КЕМЕЖ²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Акционерное общество «Первая Грузовая Компания» (АО «ПГК»), Москва, 105064, Россия

Аннотация. Представлены основные результаты аналитических работ, направленных на определение возможности увеличения до трех лет календарной продолжительности эксплуатации вагонов-хопперов (цементовозов) в рамках комбинированного критерия вывода в плановый ремонт. Сделаны выводы, что для цементовозов принадлежности АО «ПГК» с межремонтными нормативами 110 (160) тыс. км/2 года определена целесообразность апробации возможности увеличения межремонтного календарного срока до трех лет с целью сбора опытных данных о результатах их эксплуатации на увеличенном интервале межремонтной наработки.

Ключевые слова: вагоны-хопперы; цементовозы; виды отказов; показатели надежности; стоимость жизненного цикла

Введение. В течение последнего времени производители железнодорожной техники проявляют активность в разработке и продвижении инновационной вагонной продукции, и в частности грузовых вагонов, обладающих перспективными техническими характеристиками и параметрами системы технического обслуживания и ремонта (далее — СТОиР) [1, 2, 3, 4]. Несмотря на активность производителей в данном направлении на сети железных дорог «Пространства 1520», наряду с инновационными моделями вагонов продолжают использоваться грузовые вагоны существующего эксплуатационного парка. В соответствии с «Положением о СТОиР грузовых вагонов» [5] цементовозы имеют межремонтные нормативы в рамках комбинированного критерия вывода в плановый ремонт — 110 (160) тыс. км, или 2 года, в то время как другие типы грузовых вагонов, укомплектованные аналогичными взаимозаменяемыми элементами, имеют несколько большие межремонтные нормативы в календарном исчислении — 110 (160) тыс. км, или 3 года. Конечно, вагоны-хопперы для перевозки цемента имеют ряд конструктивных особенностей, отличающих их от других типов вагонов, например, наличие механизма разгрузки и несимметричной тормозной рычажной передачи, а также отличительные особенности эксплуатации и использования данного рода вагонов под перевозку специфическо-

го груза — цемента, способного к затвердеванию на поверхности их составных частей. Тем не менее факт достаточно низкой интенсивности использования по пробегу цементовозов в межремонтном периоде (≈ 50 тыс. км) послужил предпосылкой для рассмотрения возможности увеличения до трех лет межремонтной календарной продолжительности эксплуатации цементовозов. С этой целью в рамках действующего Меморандума о научно-техническом сотрудничестве между АО «ВНИИЖТ» и АО «ПГК» перед институтом по заказу грузовой компании была поставлена одноименная задача.

В настоящее время выполнены:

- анализ структуры парка цементовозов АО «ПГК»;
- анализ реализуемой наработки цементовозов в межремонтном периоде;
- анализ видов и последствий отказов цементовозов;
- оценка и сопоставление условий эксплуатации цементовозов и универсальных крытых вагонов, используемых три года в межремонтном периоде;
- оценка тенденции изменения осредненного параметра потока отказов цементовозов по мере их наработки;
- натурное обследование группы цементовозов;
- оценка технического состояния наддресорных балок группы цементовозов по параметрам, изменяющимся в ходе эксплуатации под влиянием процессов износа;
- оценка ожидаемого технико-экономического эффекта (далее — ТЭЭ) от изменения календарной периодичности ремонта цементовозов;
- формирование заключительных выводов о теоретической возможности увеличения до трех лет календарной продолжительности эксплуатации цементовозов в рамках комбинированного критерия периодичности проведения их планового ремонта.

«Анализ видов и последствий отказов — Failure Modes Effects Analysis (FMEA)». Данный метод [6, 7] является одним из инструментов менеджмента рисков в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010–2011. «Менеджмент риска. Методы оценки риска». Применительно

■ E-mail: Petrov.S.V@vniizht.ru (С. В. Петров)

Таблица 1

Категории тяжести последствий отказов цементовозов, выявленных в пункте подготовки вагонов под погрузку (ППВ)

Table 1

The categories of severity of consequences of failures of cement carriers, identified in the point of preparation of cars for loading (PPCL)

№ п/п	Код*	Наименование отказов (неисправностей) цементовозов, выявленных на ППВ	Категория тяжести последствий
1	549	Неисправность погрузочно-разгрузочных механизмов специализированных вагонов	II
2	503	Обрыв сварного шва стойки	II
3	220	Несоответствие зазоров скользуна	II

* код неисправности по Классификатору [11].

Таблица 2

Категории тяжести последствий отказов цементовозов, выявленных в пункте технического обслуживания (ПТО)

Table 2

The categories of severity of consequences of failures of cement carriers, identified in the maintenance point (MP)

№ п/п	Код*	Наименование отказов (неисправностей) цементовозов, выявленных на ПТО	Категория тяжести последствий
1	102	Тонкий гребень	II
2	106	Ползун на поверхности катания	II
3	107	Выщербина обода колеса	II
4	117	Неравномерный прокат по кругу катания выше нормы	II
5	157	Греение буксы по показаниям средств автоматизированного контроля	II
6	220	Несоответствие зазоров скользуна	II
7	205	Трещина/излом боковины (рамы)	III/IV
8	214	Излом пружин	II
9	225	Неисправность опорной прокладки в буксовом проеме	II
10	404	Неисправность тормозного цилиндра	II
11	549	Неисправность погрузочно-разгрузочных механизмов специализированных вагонов	II
12	613	Длина вертикальной/наклонной трещины на одной стенке более 100 мм между концами трещины	II
13	849	Сквозной коррозионный износ боковых стен и крыши более 25 % их поверхности	II

* код неисправности по Классификатору [11].

к цементовозам этот метод использован с целью выявления факторов (неисправностей-причин), сдерживающих возможность увеличения межремонтных сроков эксплуатации цементовозов с точки зрения критичности последствий их отказов.

На рис. 1 и 2 графически представлено долевое распределение неисправностей-причин поступления цементовозов в текущий ремонт вида ТР-1 и ТР-2 в первой половине 2016 г. Распределение составлено с учетом принципа Парето «20/80» [8, 9, 10] в порядке убывания долевого (процентного) вклада неисправностей в общий объем поступлений цементовозов в текущий ремонт. Таким образом, к числу прочих неисправностей ($\approx 20\%$) отнесены несоответствия технического состояния цементовозов, которые в наименьшей степени являются причинами поступления их в ТР-1, ТР-2.

В таблице А.1 ГОСТ 27.310–95 «Надежность в технике (ССНТ). Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения» приведена шкала возможных категорий тяжести последствий и характеристик последствий отказов технических объектов. В соответствии с данной таблицей основным выявляемым неисправностям цементовозов присвоены категории тяжести последствий (табл. 1 и 2).

С учетом возможности своевременного визуального обнаружения в условиях эксплуатации и последующего устранения вышеперечисленных неисправностей основная доля из них отнесена не к категории III или IV, а к категории II, т. к. своевременное обнаружение и устранение данных неисправностей в соответствии с действующими на инфраструктуре правилами эксплуатации вагонов позволяет исключить (снизить) опасные последствия их возникновения. Исключением является неисправность под кодом 205 — «Трещина/излом боковины (рамы)» с категорией тяжести последствий — III/IV, т. к. в эксплуатации ограничена возможность визуального распознавания данной неисправности, которая впоследствии может привести к сходу подвижного состава при негативных стечениях обстоятельств. Поэтому дополнительно был проведен анализ частоты выявления данного вида неисправности с сопоставлением с допустимыми значениями, полученными на основе требований надежности, предъявляемых к боковым рамам по ОСТ 32.183–2001 и ГОСТ 32400–2013. В табл. 3 сформулированы выводы о соответствии фактической среднегодовой частоты выявления неисправности по коду 205 действующим нормативным значениям по ОСТ 32.183–2001 и ГОСТ 32400–2013.

В ходе анализа видов и последствий отказов цементовозов не было выявлено факторов (неисправностей-причин), которые могут привести к катастрофическим последствиям при увеличении межремонтных сроков их эксплуатации. Данное обстоятельство связано с тем, что основные неисправности цементовозов и их составных частей имеют некритичную с точки зрения безопасности движения II категорию тяжести последствий, а среднегодовая частота возникновения

неисправности «Трещина/излом боковины (рамы)» с категорией III и IV не превышает установленных нормативных значений. Кроме того, своевременное выявление и устранение данных неисправностей предусмотрено действующей СТОиР грузовых вагонов.

Анализ и сопоставление условий эксплуатации цементовозов и крытых вагонов. Цементовозы и универсальные крытые вагоны эксплуатационного парка с цельнометаллическим кузовом содержат в комплектации однотипные элементы конструкции (за исключением отдельных конструкторских решений элементов кузова), в том числе: тележки в сборе (тип 2 по ГОСТ 9246–2013), автосцепные устройства (СА-3), тормозное оборудование со стандартными элементами, несущие элементы рамы, изготовленные из стандартных марок сталей. В настоящее время накоплен достаточный опыт практического применения упомянутых типовых элементов в комплектации универсальных крытых вагонов с межремонтными нормативами 3 года/110 (160) тыс. км, превышающими нормативы цементовозов, численно равные 2 года/110 (160) тыс. км. С целью установления возможности перенесения практического опыта эксплуатации типовых составных элементов крытых вагонов с межремонтными нормативами, равными 3 года/110 (160) тыс. км, на аналогичные элементы цементовозов проведен настоящий анализ, в ходе которого выполнено сопоставление условий эксплуатации цементовозов и универсальных крытых вагонов.

Для сопоставления условий эксплуатации цементовозов и крытых вагонов приняты показатели:

– *произведенная тонно-километровая работа* $\bar{A}_{т-км}(\Delta t)$ в течение заданного отчетного периода (рис. 3). Данный показатель характеризует интенсивность использования вагонов с учетом объема перевозимого груза и реализованного пробега;

Таблица 3

Среднегодовая частота выявления неисправности по коду 205 – «Трещина/излом боковины (рамы)»

Table 3

The average annual frequency of the fault finding by code 205 – "Crack/fracture of the side frame (frame)"

Год*	Среднегодовая частота выявления неисправности «205», $[10^{-3} \text{ г}^{-1}]$	Нормативное значение среднегодовой частоты отказов боковых рам, определенное на основе требований НТД, $[10^{-3} \text{ г}^{-1}]$		Вывод о соответствии нормативному значению
		ОСТ 32.183–2001	ГОСТ 32400–2013	
2015	1,559	не более 3,125	не более 1,563	соответствие
2016	1,337	не более 3,125	не более 1,563	соответствие

* для 2016 г. приведена прогнозная оценка среднегодовой частоты по результатам обработки статистических данных за первое полугодие 2016 г.

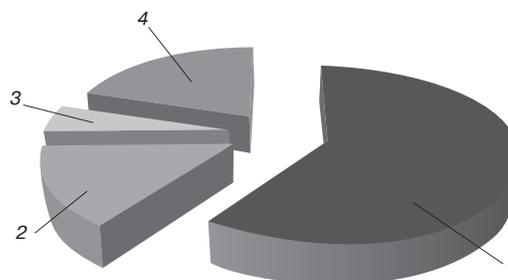


Рис. 1. Долевое распределение неисправностей-причин проведения ТР-1 цементовозов в первом полугодии 2016 г.: 1 – неисправность погрузочно-разгрузочных механизмов цементовозов (60%); 2 – обрыв сварного шва стойки (15%); 3 – несоответствие зазоров скользуна (5%); 4 – прочие (20%)

Fig. 1. Fractional distribution of faults-reasons for conducting TR-1 for cement carriers in the first half of 2016: 1 – malfunction of loading and unloading mechanisms of cement carriers (60%); 2 – breakage of the welded seam of the rack (15%); 3 – mismatches of gaps between the slips (5%); 4 – other (20%)

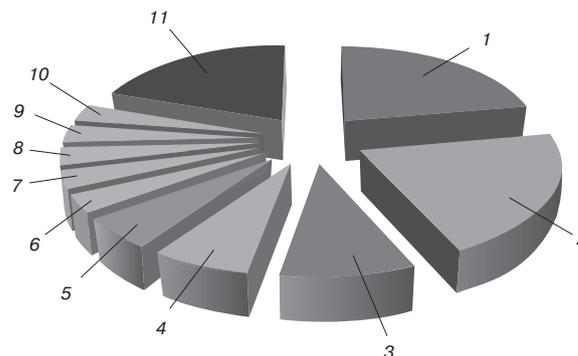


Рис. 2. Долевое распределение неисправностей-причин проведения ТР-2 цементовозов в первом полугодии 2016 г.: 1 – тонкий гребень (22%); 2 – выщербина обода колеса (21,3%); 3 – ползун на поверхности катания (9,5%); 4 – неравномерный прокат по кругу катания выше нормы (6,8%); 5 – претензии к качеству выполнения деповского ремонта (5,3%); 6 – неисправность опорной прокладки в буксовом проеме (3,2%); 7 – повреждение на путях организаций-клиентов (3,2%); 8 – грение буксы по показаниям средств автоматизированного контроля (3,1%); 9 – трещина/излом боковины (рамы) (3,1%); 10 – несоответствие зазоров скользуна (2,9%); 11 – прочие (19,6%)

Fig. 2. Fractional distribution of faults-reasons for conducting TR-2 for cement carriers in the first half of 2016: 1 – thin flange (22%); 2 – chip of the wheel tread (21,3%); 3 – slider on the surface of rolling (9,5%); 4 – uneven rolling around the running circle above the norm (6,8%); 5 – claims to the quality of performance of depot repairs (5,3%); 6 – malfunction of a support pad in a pedestal opening (3,2%); 7 – damage on the routes of client organizations (3,2%); 8 – heating of the axle box according to the indications of automated control means (3,1%); 9 – crack/fracture of the sidewall (frame) (3,1%); 10 – inconsistency of gaps between the slips (2,9%); 11 – other (19,6%)

– *удельное число отцепок в ТР-1 (ТР-2) $N_{отц}^{уд}(\Delta t_i)$, приходящееся на 1 вагон в отчетном периоде (рис. 4). Данный показатель косвенно характеризует как уровень восстановления работоспособности вагонов при плановых видах ремонта, так и интенсивность истощения ими ресурса.*

Расчет $\bar{A}_{т-км}(\Delta t)$ осуществлен по формуле:

$$\bar{A}_{\text{т-км}}(\Delta t_i) = P_{\text{зг}} \cdot l_{\text{тр}} \cdot n_{\text{тр.рейсов}}(\Delta t_i), \quad (1)$$

где $P_{\text{зг}}$ — средний уровень загрузки вагона в грузе-ном рейсе, рассчитанный для заданного отчетного периода, т/ваг; $l_{\text{тр}}$ — средняя дальность грузе-ного рейса в рассматриваемом отчетном периоде, км; $n_{\text{тр.рейсов}}(\Delta t_i) = \frac{\Delta t_i}{T_{\text{обр}}}$ — число грузе-ных рейсов в отчетном

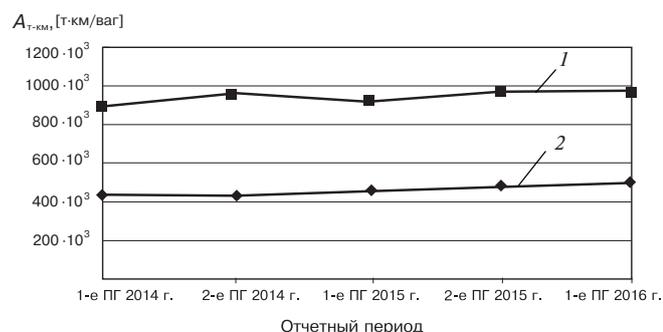
периоде, где Δt_i — величина i -го отчетного периода, численое равная одному полугодию (180 суток), сут; i — индекс отчетного периода (например, 1-е полугодие 2014 г., 2-е полугодие 2014 г. и т. д.); $T_{\text{обр}}$ — среднее время оборота вагонов в рассматриваемом отчетном пе-риоде, сут.

Величина $N_{\text{отц}}^{\text{уд}}(\Delta t_i)$ определена по формуле:

$$N_{\text{отц}}^{\text{уд}}(\Delta t_i) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{ваг}}}, \quad (2)$$

где $n(\Delta t_i)$ — общее число отцепок вагонов в ТР-1 (ТР-2) в течение рассматриваемого отчетного пе-риода, Δt_i , ед.; $N_{\text{ваг}}$ — общее число вагонов в эксплуа-тации в отчетном периоде, по которым проведен учет статистических данных, ед.

Интенсивность использования цементовозов по тонно-километровой работе в отчетных периодах в среднем в два раза меньше, чем универсальных кры-тых вагонов, укомплектованных аналогичными типо-выми элементами (рис. 3). При этом удельное число отцепок цементовозов в ТР-2 в отчетных периодах в среднем в 3,2 раза меньше, чем крытых вагонов, что косвенно свидетельствует о более интенсивном темпе исчерпания ресурса крытых вагонов по сравнению с цементовозами (рис. 4). Данные обстоятельства по-зволяют сделать вывод о том, что в комплектации це-



Обозначение: ПГ — полугодие

Рис. 3. Тенденция изменения во времени произведенной тонно-километровой работы ($A_{\text{т-км}}$) цементовозов и универсальных крытых вагонов:

1 — универсальные крытые вагоны; 2 — цементовозы

Notation: ПГ — half year

Fig. 3. The trend in time of the produced ton-kilometer work ($A_{\text{т-км}}$) of cement carriers and versatile covered cars:
1 — versatile covered cars; 2 — cement carriers

ментовозов допустима в опытном порядке эксплуата-ция в течение 3-х лет/110 (160) тыс. км однотипных элементов конструкции данных вагонов, таких как тележки, колесные пары, буксовые узлы, автосцепные устройства. При этом ожидаемым является то, что при существующей интенсивности использования цементовозов АО «ПГК» в их комплектации данные типовые элементы будут эксплуатироваться в течение идентичных межремонтных нормативов (3 года/110 (160) тыс. км) в более «щадящих условиях» (менее ин-тенсивно).

Оценка показателей надежности цементовозов. В ходе аналитических работ оценка показателей надеж-ности была проведена с учетом следующих положений:

1. Для оценки надежности принят показатель — «Осредненный параметр потока отказов».

2. Приняты следующие критерии отказов цемен-товозов и их составных частей:

а) наличие неисправности, выявленной в пункте подготовки вагонов под погрузку (ППВ) и требующей устранения в ходе ТР-1;

б) наличие неисправности, выявленной в пун-кте технического обслуживания (ПТО) и требующей устранения в ходе ТР-2;

в) наличие неисправности, выявленной на ППВ или ПТО и требующей устранения в ходе ТР-1 или ТР-2 соответственно.

3. Оценка надежности проведена:

а) для цементовозов в сборе без дифференциации по причинам отказов;

б) для цементовозов в сборе с дифференцирован-ным учетом отказов их составных частей.

4. Оценка надежности проведена для отдельных однородных групп цементовозов, сформированных с учетом следующих критериев:

а) цементовозы, эксплуатируемые в межремонт-ном периоде после деповского ремонта (ДР) с факти-ческим сроком службы до проведения первого капи-тального ремонта (КР) (не более 12 лет);

б) цементовозы, эксплуатируемые в межремонт-ном периоде после ДР с фактическим сроком службы после проведения первого КР (более 12 лет);

в) цементовозы, эксплуатируемые в межремонт-ном периоде непосредственно после проведенного КР.

5. Оценка надежности цементовозов в межремонт-ном периоде проведена для интервалов с шагом, рав-ным одному полугодию.

На рис. 5 в качестве примера графически представ-лены результаты расчета «осредненного параметра потока отказов» цементовозов без дифференциации по причинам отказов с учетом совокупных поступле-ний вагонов в ТР-1 и ТР-2.

Результаты оценки надежности цементовозов по-казали, что тенденции изменения «осредненного пара-

метра потока отказов» цементовозов в межремонтном периоде эксплуатации достаточно точно аппроксимируются возрастающей линейной зависимостью, что является закономерным с точки зрения надежности технических объектов. На прогнозируемом интервале, т. е. на третьем году эксплуатации цементовозов, не ожидается резкого критичного увеличения параметра потока отказов цементовозов. Учитывая выводы о недоиспользовании отведенного норматива пробега цементовозов и наличие опыта эксплуатации типовых составных частей в течение трех лет в межремонтном периоде, можно сделать следующий вывод:

– увеличение календарной продолжительности эксплуатации цементовозов до трех лет в рамках комбинированного критерия их вывода в плановый ремонт не должно повлиять на резкое изменение установленных прогнозных значений осредненного параметра потока отказов. Тем не менее увеличение календарной продолжительности эксплуатации цементовозов в межремонтном периоде неизбежно приведет к увеличению общей доли их отцепок в ТР-1 и ТР-2, о чем свидетельствуют прогнозные значения осредненного параметра потока отказов, что повлияет на работу сети и экономическую эффективность увеличения межремонтных нормативов. В этой связи в ходе аналитических работ также был оценен ожидаемый технико-экономический эффект (ТЭЭ) от увеличения календарного срока эксплуатации цементовозов до трех лет в рамках комбинированного критерия их вывода в плановый ремонт. Данный расчет ТЭЭ учитывает полученные прогнозные значения осредненного параметра потока отказов цементовозов и актуальные сведения о стоимости проведения ТР-1, ТР-2, ДР и КР. Результаты расчета ТЭЭ приведены в завершающей части статьи.

Обобщенные результаты натурного обследования цементовозов. Натурное обследование группы вагонов-хопперов было проведено Уральским отделением АО «ВНИИЖТ».

Результаты натурного обследования в целом коррелируются с общим массивом статистических данных об отцепках цементовозов в течение межремонтного периода эксплуатации в ТР-1 и ТР-2, источником которых является автоматизированный банк данных парка вагонов (АБД ПВ) Главного вычислительного центра (ГВЦ) ОАО «РЖД».

По результатам проведенного визуального осмотра не было выявлено неисправностей цементовозов, препятствующих возможности увеличения до трех лет календарной продолжительности эксплуатации цементовозов в рамках комбинированного критерия вывода в ремонт. Для определения возможности зарождения скрытых отказов цементовозов, контролепригодность которых отсутствует в обычных усло-

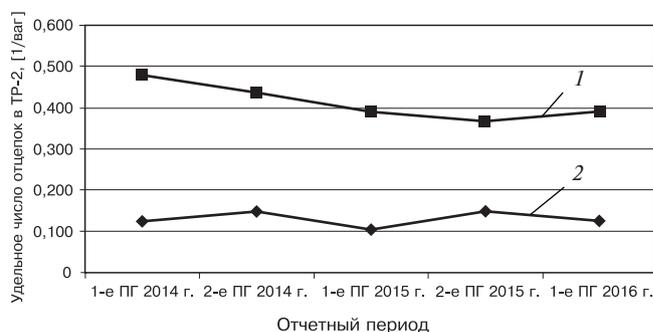


Рис. 4. Удельное число отцепок в ТР-2 цементовозов и универсальных крытых вагонов в целом: 1 — универсальные крытые вагоны; 2 — цементовозы
Fig. 4. Specific number of uncouplings in TR-2 for cement carriers and versatile covered cars in general: 1 — versatile covered cars; 2 — cement carriers

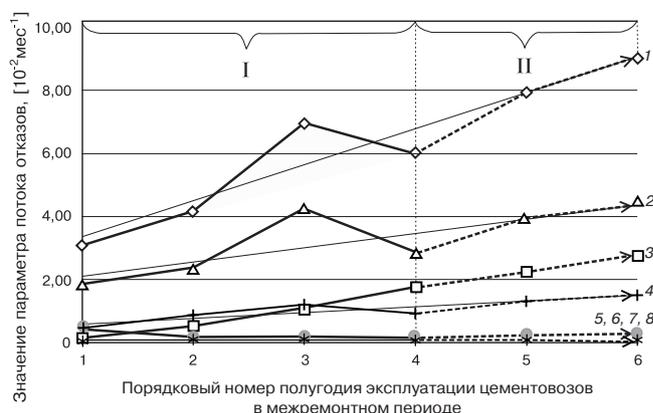


Рис. 5. Тенденция изменения осредненного параметра потока отказов цементовозов со сроком службы менее 12 лет в межремонтном периоде после депоовского ремонта с учетом поступлений в ТР-1 и ТР-2: I — область фактических значений показателя надежности в течение двух лет эксплуатации в межремонтном периоде; II — область прогнозных значений показателя надежности с перспективой на третий год эксплуатации цементовозов;

1 — без дифференциации по причинам отказов; 2 — по причине неисправностей кузова; 3 — по причине неисправностей колесных пар; 4 — по причине неисправностей тележек; 5, 6, 7, 8 — по причине неисправностей тормозного оборудования, рамы, буксовых узлов, автосцепных устройств

Fig. 5. Trend of change in the average parameter of the failure flow of cement carriers with a service life of less than 12 years in the inter-repair period after depot repairs, taking into account enters in TR-1 and TR-2:

I — area of actual values of the reliability index during two years of operation during the interrepair period; II — area of forecast values of the reliability index with a prospect for the third year of operation of cement carriers; 1 — without differentiation for failure reasons; 2 — due to body failures; 3 — due to failure of wheel sets; 4 — due to malfunction of bogies; 5, 6, 7, 8 — due to malfunctions of brake equipment, frame, axle boxes, automatic couplers

виях эксплуатации, рекомендована дополнительная специальная организация сбора данных о параметрах ответственных элементов конструкции цементовозов на этапе их подконтрольной эксплуатации на увеличенном межремонтном нормативе.

Результаты контроля основных параметров над-рессорных балок (НБ). Контроль НБ был проведен

для цементовозов, поступающих в очередной плановый ремонт по истечении межремонтных календарных сроков, с целью выявления возможных скрытых отказов и несоответствий, контролепригодность которых отсутствует в обычных условиях эксплуатации.

В табл. 4 приведены результаты расчетов обобщающих (усредненных) характеристик, контролируемых параметров НБ, а также оценена вероятность достижения данными параметрами по истечении трех лет эксплуатации цементовозов предельно допустимых без ремонта значений. Оценка проведена с учетом положений приложения И «Единой программы и методики организации и проведения подконтрольной эксплуатации новых моделей грузовых вагонов и их составных частей», разработанного специалистами АО «ВНИИЖТ» и утвержденного Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества [12].

Результаты сбора, обработки и анализа данных об изменении значений контролируемых параметров НБ по истечении двухлетнего межремонтного периода эксплуатации свидетельствуют об отсутствии для данных деталей факторов, препятствующих опытному увеличению их межремонтного периода эксплуатации до трех лет в комплектации цементовозов в рамках комбинированного критерия периодичности ремонта. При этом наиболее ожидаемыми для ремонта восстановлением по истечении трех лет эксплуатации цементовозов будут являться поверхности НБ, техническое состояние которых регламентировано размером К (диаметр внутреннего бурта подпятника), размером

Л (диаметр отверстия под шкворень) и разностью размеров $|A_1 - A_2|$ (несимметричность направляющих буртов призм НБ), т. к. вероятность (риск) превышения допустимого без ремонта значения для данных параметров по истечении трех лет эксплуатации составит приблизительно 0,39, 0,17 и 0,14 соответственно. Учитывая существующие риски преждевременного превышения безремонтных значений по отдельным параметрам НБ, необходимо в ходе апробации провести замеры основных параметров ответственных элементов конструкции цементовозов, контролепригодность которых отсутствует в обычных условиях эксплуатации.

Ожидаемый ТЭЭ. Расчет ТЭЭ от увеличения до трех лет периодичности ремонта цементовозов в рамках комбинированного критерия их вывода в плановый ремонт осуществлен на основе положений Методики [14] с учетом положений ГОСТ Р 27.202–2012 «Надежность в технике (ССНТ). Управление надежностью. Стоимость жизненного цикла».

Расчет ТЭЭ проведен в виде оценки изменения стоимости жизненного цикла (СЖЦ) цементовозов, достигаемого при увеличении периодичности проведения плановых ремонтов цементовозов до трех лет в рамках комбинированного критерия. При рассмотрении изменения СЖЦ цементовозов принято во внимание только изменение затрат на их техническое содержание (текущие и плановые виды ремонтов), остальные составляющие стоимости жизненного цикла приняты неизменными, условно постоянными и, как следствие, не влияющими на изменение СЖЦ.

Таблица 4

Результаты расчетов обобщающих (усредненных) характеристик контролируемых параметров НБ

Table 4

The results of calculations of the generalized (averaged) characteristics of the controlled parameters of NB

Наименование параметра НБ*	Среднее фактическое значение параметра, мм	Предельно допустимое значение параметра НБ без ремонта, мм	Значение параметра по рабочему чертежу, мм	Средняя величина износа за МПЭ**, мм	Средняя остаточная величина параметра, допустимая на износ без ремонта, мм	Средний темп износа, мм/г	Вероятность непревышения ремонтного значения параметра через 3 года эксплуатации	Вероятность превышения ремонтного значения параметра через 3 года эксплуатации
Размер $ A_1 - A_2 $	2,16	5	0	2,16	2,84	1,08	0,85993	0,14007
Размер E	135,76	144	134	1,76	8,24	0,88	0,99957	0,00043
Размер З	172,67	166	175	2,33	6,67	1,16	0,99865	0,00135
Размер К	74,02	72	77	2,98	2,02	1,49	0,61026	0,38974
Размер Л	56,16	60	54	2,16	3,84	1,08	0,82894	0,17106
Толщина прокладки Н (М1698)	4,64	0	6	1,36	4,64	0,68	0,99999	0,00001

* наименование контролируемых параметров и их предельно допустимые значения приняты по РД 32 ЦВ 052–2009 [13].

** МПЭ — межремонтный период эксплуатации.

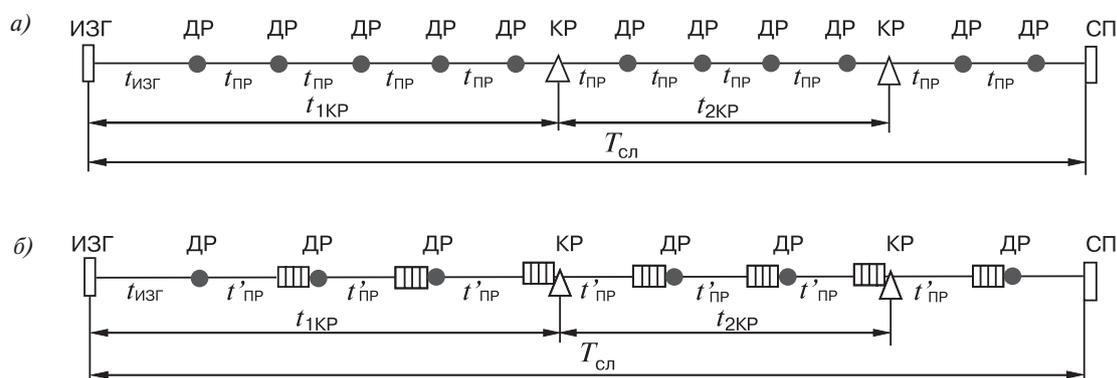


Рис. 6. Структурные схемы системы технического обслуживания и ремонта цементовозов:

a — действующая система технического обслуживания и ремонта цементовозов; *b* — новая система технического обслуживания и ремонта цементовозов; ИЗГ — изготовление; ДР — депо-ремонт; КР — капитальный ремонт; СП — списание; \square — величина $t_{ПР}$; $t_{ИЗГ} = 3$ года — продолжительность эксплуатации цементовозов до 1-го ДР; $t_{ПР} = 2$ года — действующая продолжительность эксплуатации цементовозов между плановыми ремонтами; $t'_{ПР} = 3$ года — новая продолжительность эксплуатации цементовозов между плановыми ремонтами; $t_{ПР} = 1$ год — период учета потенциальных экономических рисков, существующих вследствие возможного увеличения частоты поступления цементовозов в ТР-1 и ТР-2 на 3-м году эксплуатации; $t_{1КР} = 12$ лет — продолжительность эксплуатации цементовозов до 1-го КР; $t_{2КР} = 9$ лет — продолжительность эксплуатации цементовозов от 1-го КР до 2-го КР; $T_{сл} = 26$ лет — срок службы цементовозов

Fig. 6. Structural diagrams of the system of maintenance and repair of cement carriers:

a — the current system of maintenance and repair of cement carriers; *b* — the new system of maintenance and repair of cement carriers; ИЗГ — production; ДР — depot repair; КР — overall repair; СП — discarding; \square — value $t_{ПР}$; $t_{ИЗГ} = 3$ years — duration of operation of cement carriers up to 1 DR; $t_{ПР} = 2$ years — operating life of cement carriers between scheduled repairs; $t'_{ПР} = 3$ years — new duration of operation of cement carriers between scheduled repairs; $t_{ПР} = 1$ year — period of accounting for potential economic risks that exist due to a possible increase in the frequency of cement shipments in TR-1 and TR-2 at the third year of operation; $t_{1КР} = 12$ years — duration of operation of cement carriers up to 1st KR; $t_{2КР} = 9$ years — duration of operation of cement carriers from the 1st KR to the 2nd KR; $T_{сл} = 26$ years — service life of cement carriers

При расчете ТЭЭ:

— учтены средние текущие стоимости выполнения цементовозам ТР-1, ТР-2, ДР и КР;

— не учтено получение прибыли от сокращения суммарного времени простоя вагонов в депо-ремонте в течение всего срока службы;

— не учтено возможное увеличение объема ремонтных работ при ДР и, как следствие, его возможное удорожание при проведении данного ремонта по истечении увеличенного на один год межремонтного норматива.

Расчет ТЭЭ осуществлен в пределах назначенного срока службы цементовозов без учета возможного периода продления срока полезного использования. При его оценке были учтены потенциальные экономические риски, существующие вследствие возможного увеличения частоты поступления цементовозов в ТР-1 и ТР-2 на третьем году эксплуатации, а значит, стоимости текущего содержания цементовозов при переходе на увеличенную периодичность ремонта.

Разновременность вложения затрат на техническое содержание цементовозов учтена дисконтированием денежного потока к текущему (рассматриваемому) моменту при ежегодном росте цен на техническое содержание цементовозов за счет инфляции.

На рис. 6 приведены графические схемы системы технического обслуживания и ремонта цементовозов, на основе которых был проведен расчет ТЭЭ с сопоставлением ежегодных затрат на текущие и плановые

ремонты цементовозов в соответствии с действующей и новой периодичностью ремонта.

С учетом разновременности несения затрат на текущие и плановые ремонты удельное сокращение СЖЦ цементовозов составит примерно 2,5 тыс. руб. на 1 вагон за год эксплуатации при норме дисконта $E_p = 0,1$ (10%) и уровне инфляции $i = 0,05$ (5%). В расчете по базовым (неизменным) ценам ($E_p = 0, i = 0$) сокращение СЖЦ составит примерно 8,9 тыс. руб. на 1 вагон за год. В перерасчете на среднегодовой объем ремонта цементовозов парка АО «ПГК» с учетом разновременности несения затрат удельное сокращение СЖЦ составит 8,5 млн руб. в год, а в расчете по базовым (неизменным) ценам — приблизительно 30,2 млн руб. в год. Таким образом, по результатам расчета ТЭЭ, в количественном эквиваленте подтверждена экономическая целесообразность увеличения до трех лет календарной продолжительности эксплуатации цементовозов в рамках комбинированного критерия их вывода в плановый ремонт.

Заключение. Для цементовозов принадлежности АО «ПГК» с межремонтными нормативами по пункту 1.7 табл. 2 «Положения о СТОиР грузовых вагонов» (110 (160) тыс. км/2 года) определена целесообразность апробации возможности увеличения межремонтного календарного срока до трех лет в рамках комбинированного критерия вывода в плановый ремонт с целью сбора опытных данных о результатах их эксплуатации на увеличенном интервале межремонтной наработки.

Результаты апробации увеличенного календарного межремонтного норматива цементовозов парка АО «ПГК» смогут послужить основой для рассмотрения возможности увеличения периодичности проведения плановых ремонтов всей совокупности цементовозов эксплуатационного парка совместного использования государств — участников Содружества, для которых параметры системы технического обслуживания и ремонта регламентированы выше-названным документом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Время ОВК: корпоративный журнал для клиентов. 2017. № 4. 25 с. URL: https://www.uniwagon.com/documents/88y/%D0%92%D0%A0%D0%95%D0%9C%D0%AF_%D0%9E%D0%92%D0%9A_4_%D0%90%D0%9F%D0%A0%D0%95%D0%9B%D0%AC_2017_%D0%93.pdf (дата обращения: 03.05.2017 г.).
2. Соколов А. М. В тяжелом весе лидируют инновации // Инновации транспорта. 2017. № 1. С. 30–33.
3. Статистика // Техника железных дорог. 2016. № 4. С. 40–41.
4. «ВМ-ТРАНС» приобретет у НПК ОВК до 3000 вагонов нового поколения (по материалам пресс-службы НПК ОВК) // Вагоны и вагонное хозяйство. 2016. № 1. 37 с.
5. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении: утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества / Дирекция Совета по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества. Протокол № 57 от 17.10.2012. М., 2012. 16 с.
6. Robert L. Nuckolls III. Failure Modes Effects Analysis — Confidence by Design // Sport Aviation. January, 1994. Updated September 3. URL: <http://www.aeroelectric.com/articles/Philosophy/FMEA.pdf> (дата обращения: 14.04.2017 г.).
7. Failure Modes & Effects Analysis. URL: <http://people.ualgary.ca/~design/engg251/First%20Year%20Files/fmea.pdf> (дата обращения: 03.05.2017 г.).
8. Pareto Principle. How the 80/20 Rule Helps Us be More Effective. URL: http://www.pinnacle.com/Articles/Pareto_Principle/pareto_principle.html (дата обращения: 14.04.2017 г.).
9. Koch R. The 80/20 Principle: The Secret of Achieving More With Less. Nicholas Brealey Publishing, 1998. 302 p. URL: <http://www.leadershipcoachingblog.com/wp-content/uploads/2012/03/the-80-20-principle-to-achieve-more-with-less-effort1.pdf> (дата обращения: 04.05.2017 г.).

10. Пахомов А. П. Применять или не применять принцип Парето на практике? // Вестник Российского университета дружбы народов. 2010. № 1. С. 5–12. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/primenyat-ili-ne-primenyat-princip-pareto-na-praktike> (дата обращения: 04.05.2017 г.).

11. КЖА 2005 05. Классификатор «Основные неисправности грузовых вагонов» / Дирекция Совета по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества. М., 2005. 16 с.

12. Единая программа и методика организации и проведения подконтрольной эксплуатации новых моделей грузовых вагонов и их составных частей: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества. Протокол № 65 от 26.10.2016 г. М., 2016. 58 с.

13. РД 32 ЦВ 052–2009. Ремонт тележек грузовых вагонов с бесконтактными скользунами: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества. Протокол № 52 от 14.05.2010 г. / Дирекция Совета по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества. М., 2010. 40 с.

14. Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 27.12.2007 г. № 2459р.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕТРОВ Сергей Владимирович,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория «Вагонное хозяйство», отделение «Вагоны и вагонное хозяйство», АО «ВНИИЖТ»

РАЙКОВ Герман Васильевич,

канд. техн. наук, заведующий лабораторией «Вагонное хозяйство», отделение «Вагоны и вагонное хозяйство», АО «ВНИИЖТ»

ВАСИЛЬЕВ Алексей Викторович,

канд. техн. наук, заведующий отделением «Вагоны и вагонное хозяйство», АО «ВНИИЖТ»

ГОНЧАРОВ Сергей Евгеньевич,

заместитель генерального директора по техническому развитию — главный инженер, АО «ПГК»

КЕМЕЖ Александр Николаевич,

заместитель начальника Департамента производственной инфраструктуры и технической политики, АО «ПГК»

Статья поступила в редакцию 05.04.17 г., принята к публикации 01.06.2017 г.

Determination of the possibility of increasing the between-repair standards of hopper cars (cement carriers)

S. V. PETROV¹, G. V. RAYKOV¹, A. V. VASIL'EV¹, S. E. GONCHAROV², A. N. KEMEZH²

¹ Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

² Joint Stock Company "First Freight Company" (JSC "Freight One"), Moscow, 105064, Russia

Abstract. In view of gradual changes in the conditions of maintenance, extensiveness and intensity of the use of freight cars of the operational fleet throughout their service life, it is advisable to periodically review between overhaul norms for certain types of cars to ensure a given level of traffic safety and reduce the costs of maintenance and repair in changed conditions.

This article presents the main results of the analytical work aimed at determining the possibility of increasing the period of operation of the hopper cars (cement carriers) to three years in the framework of the combined criteria for draw them to scheduled repairs.

These analytical works include:

- analysis of the structure of the fleet of cement carriers of JSC “Freight One”;
- analysis of the operating time of cement carriers in the inter-repair period;
- analysis of the types and consequences of failures of cement carriers;
- evaluation and comparison of operating conditions of cement carriers and covered wagons operated for three years during the between-repairs period within the framework of the combined criterion;
- evaluation of the trend of the change in the average parameter of the flow of failures as they are used in the inter-repair period;
- analysis of data from field survey of a group of cement carriers;
- an estimation of a technical condition of bolster beams of group of cement carriers on the parameters subject to influence of processes of deterioration;
- an estimate of the expected technical and economic effect of changing the calendar periodicity of repair of cement carriers.

As a result of the analytical work carried out for cement carriers owned by JSC “Freight One” with inter-repair standards of 110 (160) thousand km/2 years, it was determined the feasibility of approbation of the possibility of increasing the inter-repair time period to three years with the purpose of collecting experimental data on the results of their operation at an increased interval of between-repair operation.

The results of approbation of the increased calendar inter-repair standard of cement carriers of the JSC “Freight One” fleet can serve as a basis for considering the possibility of increasing the frequency of planned repairs of the whole aggregate of cement carriers of the operating fleet of joint use of the Commonwealth member states.

Keywords: hopper cars; cement carriers; types of failures; reliability indicators; life cycle cost

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-165-173>

REFERENCES

1. OVK Time: Corporate magazine for customers, 2017, no. 4, 25 p. URL: https://www.uniwagon.com/documents/88y/%D0%92%D0%A0%D0%95%D0%9C%D0%AF_%D0%9E%D0%92%D0%9A_4_%D0%90%D0%9F%D0%A0%D0%95%D0%9B%D0%A0_C_2017_%D0%93.pdf (retrieved on 03.05.2017).
2. Sokolov A. M. *V tyazhelom vese lidiruyut innovatsii* [In heavy weight innovations are leading]. Innovatsii transporta [Transport innovations], 2017, no. 1, pp. 30–33.
3. *Statistika* [Statistika]. Tekhnika zheleznikh dorog [Railway Equipment Magazine], 2016, no. 4, pp. 40–41.
4. «VM-TRANS» priobretet u NPK OVK do 3000 vagonov novogo pokoleniya (po materialam press-sluzhby NPK OVK) [VM-TRANS will acquire up to 3000 new generation wagons from NPK OVK (according to the materials of the press-service of the NPK OVK)]. Vagony i vagonnoe khozyaystvo, 2016, no. 1, 37 p.
5. *Regulations on the system of maintenance and repair of freight cars admitted to circulation on public railways in international traffic*: approv. by the Council for Rail Transport of the Commonwealth Member States. Protocol no. 57 on 17 October 2012. Moscow, Directorate of the Council for Rail Transport of the Commonwealth Member States Publ., 2012, 16 p. (in Russ.).

6. Robert L. Nuckolls III. *Failure Modes Effects Analysis – Confidence by Design*. Sport Aviation. January 1994, Updated September 3. URL: <http://www.aeroelectric.com/articles/Philosophy/FMEA.pdf> (retrieved on 14.04.2017).

7. *Failure Modes & Effects Analysis*. URL: <http://people.ucalgary.ca/~design/engg251/First%20Year%20Files/fmea.pdf> (retrieved on 03.05.2017).

8. *Pareto Principle. How the 80/20 Rule Helps Us be More Effective*. URL: http://www.pinnacle.com/Articles/Pareto_Principle/pareto_principle.html (retrieved on 14.04.2017).

9. Koch R. *The 80/20 Principle: The Secret of Achieving More With Less*. Nicholas Brealey Publishing, 1998, 302 p. URL: <http://www.leadershipcoachingblog.com/wp-content/uploads/2012/03/the-80-20-principle-to-achieve-more-with-less-effort1.pdf> (retrieved on 04.05.2017).

10. Pakhomov A. P. *Primenyat' ili ne primenyat' printsip Pareto na praktike?* [Should or shouldn't we apply the Pareto principle in practice?]. Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov [Bulletin of the Russian University of Peoples' Friendship], 2010, no. 1, pp. 5–12. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/primenyat-ili-ne-primenyat-printsip-pareto-na-praktike> (retrieved on 04.05.2017).

11. KZhA 2005 05. Classifier “The main malfunctions of freight cars”. Moscow, Directorate of the Council for Rail Transport of the Commonwealth Member States Publ., 2005, 16 p. (in Russ.).

12. *Unified program and methodology for the organization and conducting controlled operation of new models of freight cars and their components*. Approved by the Council for Rail Transport of the Commonwealth Member States. Protocol no. 65 on 26.10.2016. Moscow, Directorate of the Council for Rail Transport of the Commonwealth Member States Publ., 2016, 58 p. (in Russ.).

13. RD 32 TsV 052–2009. *Repair of freight cars with contactless slides*: approv. by the Council for Rail Transport of the Commonwealth Member States. Protocol no. 52 on 14.05.2010. Moscow, Directorate of the Council for Rail Transport of the Commonwealth Member States Publ., 2010, 40 p. (in Russ.).

14. *Methodology for determining the cost of the life cycle and the limit price of rolling stock and complex technical systems of railway transport*. Approved by the Order of JSC “Russian Railways” on 27.12.2007, no. 2459r. (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. PETROV,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory “Car facility”, Department “Cars and car facility”, JSC “VNIIZhT”

German V. RAYKOV,

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory “Car facility”, Department “Cars and car facility”, JSC “VNIIZhT”

Aleksey V. VASIL'EV,

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department “Cars and car facility”, JSC “VNIIZhT”

Sergey E. GONCHAROV,

Deputy Chief Technical Development Officer – Chief Engineering Officer of JSC “Freight One”

Aleksandr N. KEMEZH,

Deputy Head of the Department of production information and engineering policy, JSC “Freight One”

Received 05.04.2017

Accepted 01.06.2017

E-mail: Petrov.S.V@vniizht.ru (S. V. Petrov)

Перспективность применения металлоуглеродных контактных вставок для токосъема на железных дорогах России*

В. Я. БЕРЕНТ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Рассмотрен опыт применения в полозах токоприемников электровозов токосъемных элементов — контактных вставок из углеродных материалов с целью уменьшения износа как контактного провода, так и самих токосъемных элементов. Показано, что электрический контакт из меди и углеродных материалов является не симметричным из-за больших различий их физических свойств. В связи с этим при токосъеме высоких токов углеродные вставки интенсивно нагреваются, вызывая разупрочнение контактного провода и его электроэрозионный износ. Предлагается снизить интенсивность этих явлений приближением электрического контакта к симметрии за счет пропитки углеродного материала расплавом металла. Стендовыми и эксплуатационными испытаниями показано преимущество металлоуглеродных вставок по сравнению с угольными.

Ключевые слова: металлоуглеродные вставки; угольные вставки; вставки из природного графита; симметричный электрический контакт; несимметричный электрический контакт; износ; электроэрозия; электрическая дуга; температура; падение напряжения в контакте

Введение. Прошло более пятидесяти лет с начала применения на железных дорогах России угольных вставок для токосъема на электроподвижной состав. Использование угольных вставок было совершенно оправдано, так как для уменьшения износа медного контактного провода необходимо было исключить в трибосистеме сильноточного скользящего контакта взаимодействие одноименных металлов. Медные монолитные контактные пластины на полозах токоприемников вызывали сильный износ контактного провода за счет схватывания; это явление невозможно было предотвратить регулярной подачей в узел трения внешней смазки — жидкой или сухой графитовой. Необходимо было подобрать для скользящего контакта совместимую пару трения, не вызывающую процесса схватывания при трении скольжения. Материалом токосъемного элемента полоза в этом случае должен быть элемент, резко отличающийся по своей природе от меди. Взаимодействующими телами в этом случае должны быть металл и неметалл, что и было воспроизведено в паре медь — углерод. Преимуществом этой пары трения является то, что

медь и углерод не вступают в реакцию друг с другом ни в жидком, ни в твердом состоянии. Удельный износ медного контактного провода на дорогах переменного тока был снижен в несколько раз, в среднем до $0,113 \text{ мм}^2$ на 10^4 проходов токоприемников. Однако при прохождении больших токов были отмечены повреждения угольных вставок и контактного провода, что потребовало вновь вернуться к рассмотрению вопросов токосъема.

Физические процессы при токосъеме. При потреблении больших мощностей при токосъеме с контактной сети переменного тока напряжением 25 кВ на электроподвижной состав снимаются сравнительно небольшие по величине токи, которые не вызывают интенсивный нагрев угольных вставок, а следовательно, и нагрев медного контактного провода. При низких температурах поверхностей скользящего контакта износ его компонентов от электроэрозионных процессов протекает весьма слабо. Контактный провод, не подвергаясь высоким нагревам от угольных вставок, не теряет своих прочностных характеристик. Однако при дуговом токосъеме в опорной точке электрической дуги температура достигает $3000\text{--}5000 \text{ }^\circ\text{C}$, угольные вставки и контактный провод подвергаются интенсивному электроэрозионному износу. Совершенно другая ситуация складывается при взаимодействии с контактной сетью постоянного тока напряжением 3 кВ, т. к. в этом случае для потребления такой же мощности токи значительно возрастают, происходит интенсивный нагрев угольных вставок с опасностью разупрочнения контактного провода и его разрушения. От воздействия высоких нагревов поверхностей скользящего контакта резко увеличивается электроэрозия провода и угольных вставок, их износ повышается. При нормальном токосъеме пробег полозов с угольными вставками составляет 20–40 тыс. км.

Разупрочнение контактного провода проявляется при падении напряжения в контакте с угольной вставкой на 1,8 В, температура внутри вставки при этом достигает $700 \text{ }^\circ\text{C}$, а при падении напряжения в контакте

■ E-mail: val.berent@yandex.ru (В. Я. Берент)

* Статья допущена к публикации в рамках научной дискуссии.

те с угольной вставкой на 2,7 В температура внутри вставки поднимается до 1580 °С и идет ее интенсивное окисление. Выделение высоких температур в контакте опасно из-за возможности возгорания вставок, температура угольной вставки 360 °С является порогом начала интенсивного ее окисления [1]. Прижатие угольных вставок с удельным электрическим сопротивлением 35 мкОм·м к проводу с усилием 20 Н при токах более 90 А приводило к чрезмерному нагреву контактного провода. Расчетами определено, что падение напряжения в контакте, при котором наступает разупрочнение поверхностного слоя меди провода, составило 1,8 В для нормальных условий эксплуатации. При токосъеме угольными вставками на постоянном токе поверхностные слои контактного провода величиной до 1 мм полностью разупрочняются с прохождением рекристаллизации. Рентгеноструктурным анализом было установлено менее интенсивное разупрочнение провода в поверхностном слое до 3 мм [2]. Аналогичные явления в микроструктуре меди контактных проводов были установлены в работе компании Furrer+Freu [3]. Исследованиями определялась структура и твердость меди провода в месте контакта провода с угольными вставками SK01 с удельным сопротивлением 35 мкОм·м, в зависимости от величины снимаемого тока. Твердость контактного провода в исходном состоянии — 100 НВ, при снятии тока 120 А провод нагревается до 270 °С со снижением твердости до 57 НВ — почти до твердости отожженной меди (50 НВ). Высокие температуры нагрева угольных вставок были подтверждены и отечественными исследованиями. При токосъеме 890 А угольными вставками марки А в течение 0,5 секунд материал вставки на расстоянии 3 мм от поверхности контакта нагревается до 405 °С, а вставками марки Б — до 225 °С. Поверхность контакта провода при взаимодействии с угольной вставкой при токосъеме в течение одной секунды нагревается до 305 °С (при вставке А) и 210 °С (при вставке Б) [2].

На однополосном токоприемнике электровоза ВЛ11, ведущего поезд массой 6000 т, при скорости 60 км/ч и токе 1200 А угольные вставки марки А нагревались до 420 °С, марки Б — до 240 °С [2]. По данным компании SNCF интенсивный нагрев поверхностных слоев угольных вставок до 200–250 °С наблюдался при испытании высокоскоростного электропоезда TGV в режиме тяги на подъеме со скоростью 200 км/ч и снимаемом токе 1500 А. В связи с этим было предложено ограничить снимаемый ток при движении величиной не более 1200 А [4].

Анализ свойств материала вставок. Действительно, токосъем больших токов делает применение угольных вставок невыгодным, несмотря на устранение схватывания трущихся поверхностей, снижение механи-

ческого износа, так как интенсивный нагрев ведет к повышению изнашивания из-за увеличения интенсивности электроэрозионных процессов. Так, если доля поездов с электровозной тягой на участках возрастает с 35 до 50 и 67%, то износ контактного провода увеличивается соответственно до 0,104, 0,158 и 0,204 мм² на 10⁴ проходов токоприемников [5]. На участке Малоярославец — Сухиничи Московской железной дороги после 10 лет использования для токосъема угольных вставок износ провода на отдельных анкерных участках составил от 0,36 до 0,95 мм² на 10⁴ проходов токоприемников. На перегоне Москва — Ожерелье, где преобладает грузовое движение, износ провода в 1,6–2 раза выше по сравнению со средними значениями для дорог переменного тока и достигает 0,481 мм² на 10⁴ проходов токоприемников.

Определение допустимых предельных токов для угольных вставок с целью предотвращения разупрочнения от перегрева контактного провода и его повышенного электроэрозионного износа осуществляли на натурном стенде ВЭЛНИИ в Новочеркасске. Испытаниями было установлено, что угольные вставки марок А и Б могут на стоянке летом снимать соответственно ток 73 и 95 А, зимой — 95 и 115 А, в движении — 900 и 1050 А. В связи с этим в [6, 7] было показано, что для современных мощных электровозов постоянного тока угольные вставки применять нецелесообразно, т. к. величины токов могут достигать 3000 А.

Одной из причин неустойчивой работы вставок была несимметричность электрического контакта с проводом. Попытки повысить симметричность за счет понижения у углеродного материала удельного электрического сопротивления до 5–8 мкОм·м не принесли положительных результатов. Например, угольные вставки марки С из природного графита с такими электрическими свойствами в массовом порядке выходили из строя по износу в зимний период при дуговом токосъеме из-за низкой электроэрозионной стойкости. Пробег полозов с вставками марки С на перегоне Мурманск — Кандалакша Октябрьской железной дороги достигал 1800 км [7], в то время как они должны обеспечивать пробег полозов токоприемников в экстремальных условиях до 20 тыс. км.

Эрозия контактов зависит от выделившейся на электродах энергии, а следовательно, от количества электричества, протекающего в дуге, и возрастает линейно с током. Повреждения от электроэрозии снижаются при повышении теплопроводности материала контакта из-за более интенсивного отвода тепловой энергии от зоны воздействия электрической дуги.

Выявлено три механизма разрушения контактов при электроэрозии: испарение, разбрызгивание расплавленного материала и химические процессы, связанные с взаимодействием материала контактов с

элементами окружающей среды, и как следствие, разрушение образовавшихся пленок при термическом воздействии. Всеми исследователями эрозии отмечается различие в износе и повреждаемости композиционных и однородных материалов контактов [8, 9, 10]. Несовместимое сочетание свойств у материалов контактов достигается при монофазном их исполнении. Гетерогенная структура материалов, представляющая собой смесь отдельных фаз с различными свойствами, позволяет на основе аддитивности получить композит с набором противоречивых свойств [8, 11, 12, 13].

Для сильноточных скользящих контактов следует применять термостойкую матрицу — каркас, а для придания ей необходимых электрических и теплопроводных свойств в матрице следует размещать менее тугоплавкую фазу с соответствующими характеристиками. В данном случае проявляется положительная роль гетерогенной структуры композиционных материалов, так как в опорной точке дуги потери тепловой энергии происходят от нагрева, плавления, кипения и испарения легкоплавкой фазы, а термостойкий каркас в меньшей степени подвергается тепловому воздействию и затрудняет выброс жидкой фазы из материала контакта [12], удерживая ее в порах силами поверхностного натяжения [8]. В результате происходит рассредоточение тепловых потоков, исходящих из опорной точки дуги.

Общепринятое правило построения электрических контактов каркасного типа полностью согласуется со структурным построением металлоуглеродных вставок. В результате электроэрозионная стойкость металлоуглеродных вставок оказалась выше, чем у однофазных матричных контактов из углерода. Это было установлено не только эксплуатационными испытаниями на отечественных и зарубежных дорогах, но и проведением стендовых испытаний [13]. В серии натурных испытаний было показано, что при бездуговом токосъеме износ обоих вставок (угольных и металлоуглеродных) был примерно одинаков, ($1 \text{ мм}^3/\text{км}$). При увеличении интенсивности дугообразования износ угольных вставок возрастал до $4,15 \text{ мм}^3/\text{км}$, а металлоуглеродных вставок — до $2,65 \text{ мм}^3/\text{км}$.

Сравнительные испытания показали, что металлоуглеродные вставки фирмы Hoffmann с гетерогенной структурой с легкоплавкой фазой меди на стоянке могли снимать ток 180–220 А, в движении — 1850 А. Угольные вставки С и О имели такое же удельное сопротивление, как и Hoffmann, но по своей структуре не позволяли противодействовать дуговым разрядам и не могли быть использованы для снятия токов на мощных электровозах [7].

Учитывая приведенные закономерности поведения материалов контактов при воздействии на них электрических разрядов, автором произведены иссле-

дования материалов токосъемных элементов полозов токоприемников, их свойств и процессов, происходящих во время эрозии.

Наилучшим способом приближения к симметричному электрическому контакту является металлизация углеродной матрицы вставки. Ввод меди или ее сплавов в виде их расплавов в пористый углеродный материал пропиткой позволяет получить электрический контакт каркасного типа с более высокой теплопроводностью и электропроводностью. Автором были проведены исследования теплоемкости, теплопроводности и пластичности углеродных материалов различной природы на автоматическом сканирующем калориметре КСИТ-1300. В калориметре использовался метод плоского теплового источника в стационарном и динамическом тепловом режиме. Исследовались серийные угольные вставки марок А, Б, О и металлоуглеродные вставки отечественного опытного производства и зарубежных фирм. У материалов этих вставок в интервале температур от 20 до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ определялись относительное удлинение, термический коэффициент линейного расширения и теплопроводность (см. таблицу).

Физические свойства угольных вставок марки Б, изготовленных из искусственного графита, были более благоприятными, чем у угольных вставок марки А, так как их удельное сопротивление в два раза ниже. Это отразилось на характере их повреждаемости электрической дугой. В месте воздействия электрического разряда у угольных вставок марки А образовывались многочисленные глубокие трещины с разрыхлением поверхности, а у вставок марки Б эти повреждения проявлялись в меньшей степени.

По своей теплопроводности и пластичности металлоуглеродные вставки превосходят угольные вставки, а следовательно, обладают более высокой стойкостью к электроэрозии. У металлоуглеродных вставок от воздействия той же мощности дуг термические трещины вообще не появились. Исследования на растровом микроскопе JEOL JXA-50A показали, что в донной части небольшого кратера от воздействия дуги меди оставалось мало, но она в большей степени разместилась по краям кратера. В этом месте происходит вытеснение, выпотевание меди на поверхность. В ряде случаев из-за вытеснения расплава меди газами образовывались сферические полые частицы (рис. 1). На периферии от кратера медь из паров выделяется в виде чешуйчатых образований и мелких частиц сферической формы (рис. 2).

Эти явления, обнаруженные при испытаниях различных видов углеродных материалов от действия электрической дуги, позволили объяснить как устойчивость одних материалов к электроэрозии, так и высокую повреждаемость других (рис. 3).

На установке ИМД-1 автором проведена сравнительная оценка дугостойкости материалов токоъемных элементов. Воздушный промежуток между графитовым электродом и испытываемым материалом составлял 1 мм, время горения дуги — 2 с при токе 125–159 А. Результаты испытаний показали, что показатели потери материала (D_1 , D_2) у металлоуглеродных вставок, изготовленных по технологии пропитки (фирм Schunk, Ringsdorf, Morganite) ниже, чем у углеродных вставок А и Б. Ввод меди до 30% в виде порошка в шихту вставок А и Б (вставки УМА и УМБ) малоэффективен из-за разобшенности частиц меди в углеродной матрице. В металлоуглеродных вставках, изготовленных пропиткой углеродной матрицы металлом, образовывались взаимосвязанные каналы тепло- и электропроводности, что и позволяет повысить их эрозионную стойкость.

Наличие теплопроводной, электропроводной и легкоплавкой фазы в составе углеродного материала улучшило электрический контакт с проводом за счет снижения при их взаимодействии переходного сопротивления и появления жидкой фазы от расплавления нагретой током меди. Это, в свою очередь, уменьшило электроэрозионные повреждения контактов и потери электроэнергии при токоъеме. Процесс, при котором отмечалось снижение переходного сопротивления, был исследован при определении зависимости переходного сопротивления металлоуглеродных вставок и провода от времени контакта (рис. 4).

Сравнение переходного сопротивления R_k в различные промежутки времени показало, что достижение высоких температур нагрева в зоне контакта и формирование проводящих ток участков происходит за миллисекунды и завершается в первом полупериоде переменного тока частотой 50 Гц (10 мс). Поэтому зависимости $R_k = f(I)$ были построены для в основном сформировавшегося контакта (за 0,07 с) и сложившегося контакта (за 1,5 с протекания тока). Механизм формирования контакта при прохождении тока через контактный провод на токоъемный элемент полоза косвенно определяется по искажениям синусоид тока I и напряжения U в различные моменты времени. Синусоиды строились процессором SF-920 для самого начального момента прохождения тока через контакт и по истечении некоторого времени.

В первый момент на контакте медного провода с металлоуглеродной вставкой образуется пятно проводимости в месте выхода на поверхность при расплавлении металлической фазы из углеродной основы вставки, но из-за высокой плотности тока происходит разбрызгивание и испарение расплавленного металла. В этот момент мгновенные значения тока I и напряжения U претерпевают изменения. Затем осуществляется контакт медь провода — углеродный



Рис. 1. Выделение меди в виде сферических частиц на поверхности углеродного материала у кратера от воздействия дуги ($\times 300$)
Fig. 1. Separation of copper by the form of spherical particles on the surface of the carbon material at the crater from the action of the arc ($\times 300$)

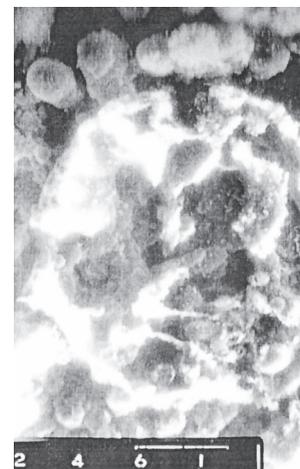


Рис. 2. На участках поверхности, удаленных от кратера, выделения меди носят чешуйчатый характер в виде мелких сфер ($\times 300$)
Fig. 2. In the areas of the surface remote from the crater, the discharge of copper is scaly and in the form of small spheres ($\times 300$)

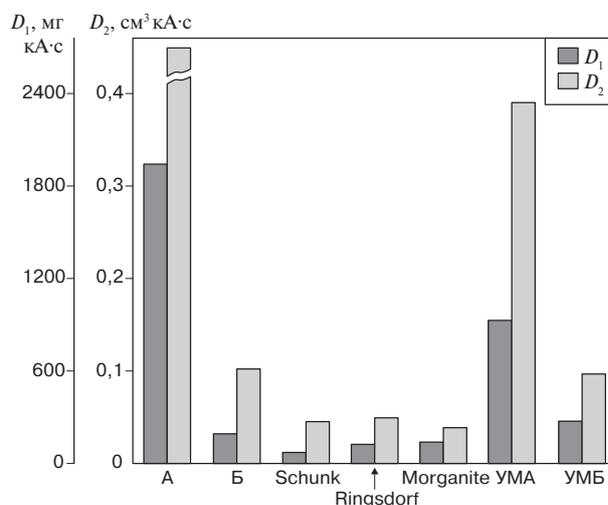


Рис. 3. Потери материала при электроэрозии углеродных токоъемных вставок, не содержащих и содержащих медь: D_1 — весовая потеря материала; D_2 — объемная потеря материала; УМА и УМБ — вставки марок А и Б с вводом медного порошка через углеродную шихту; вставки фирм Schunk, Ringsdorf, Morganite — металлоуглеродные

Fig. 3. Wastage of material in case of electric erosion of carbon collector strips which contains and are free of copper: D_1 — weight loss of material; D_2 — volume loss of material; UMA and UMB strips of grades А and В with the introduction of copper powder charge; strips of Schunk, Ringsdorf, Morganite production — metallocarbon

материал металлоуглеродной вставки, и напряжение увеличивается. По истечении 20–30 мс при выделении тепловой энергии в контакте в зону его поступает легкоплавкая фаза, и в таких количествах, что обеспе-

Рис. 4. Изменение переходного сопротивления различных видов углеродных вставок с медным контактным проводом в зависимости от величины снимаемого тока и времени его протекания:
 1 — вставка марки А; 2 — вставка марки Б; 3, 4 — металлоуглеродные вставки фирм Morganite и Ringsdorf

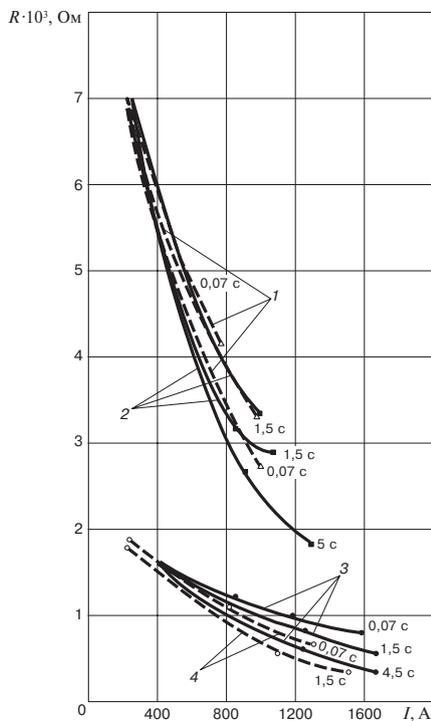


Fig. 4. Change in the transient resistance of various types of carbon strips with a copper contact wire, depending on the value of the current being removed and the time it takes to flow:
 1 — strip of grade A; 2 — strip grade B; 3, 4 — metalcarbon strips by Morganite and Ringsdorf

чивается металлический контакт со стабилизацией значений I и U , где $U = f(I)$, $I = f(U)$ без изменений.

Величины R_k имеют наибольшие значения для серых угольных вставок без легкоплавкой фазы, а ввод в углеродную матрицу легкоплавкой структурной составляющей снижает R_k в несколько раз [2].

Высокие эксплуатационные свойства металлоуглеродных вставок вызвали необходимость проведения научно-исследовательских работ по разработке состава и технологии изготовления отечественных металлоуглеродных вставок с целью устранения их импорта. Ранее закупались металлоуглеродные вставки фирмы Hoffmann для скоростных поездов ЭР-200, в настоящее время закупаются вставки фирмы Siemens для поездов «Сапсан». В связи с этим автором статьи были проведены исследования свойств углеродных материалов марок МПГ-7, МГ-1 и ниппельного графита после пропитки медью. Результаты

исследования показали, что по токовой нагрузочной способности опытные металлоуглеродные вставки превосходят аналогичные вставки фирмы Hoffmann. На стоянке летом пропитанная медью вставка из ниппельного графита может снимать ток 215 А, а фирмы Hoffmann — 180 А.

Эксплуатационные сравнительные испытания металлоуглеродных и угольных вставок марки Б проводили в зимний период при наличии дугового токосъема. На 15 электровозов ЧС2т один полоз был оборудован в локомотивном депо Мурманск Октябрьской железной дороги угольными вставками марки Б, а другой — металлоуглеродными вставками фирмы Ringsdorf. На участке постоянного тока Мурманск—Лоухи за месяц по предельному износу было заменено 32 полоза с угольными вставками и 7 полозов с металлоуглеродными вставками. При резком понижении температуры износ вставок марки Б в период дугового токосъема составил 16,5 мм на 10^3 км, а металлоуглеродных вставок — 8 мм на 10^3 км. Контактная поверхность металлоуглеродных вставок в отличие от угольных была гладкой и ровной и без электроэрозионных повреждений.

После замены на этом участке системы постоянного тока на переменный были повторно проведены аналогичные испытания на базе локомотивного депо Кандалакша. Полоза токоприемников электровозов ВЛ82 в количестве 20 локомотивов оборудовались угольными вставками марки А, а 20 других — металлоуглеродными вставками фирмы Hoffmann. В зимний период при наличии дугового токосъема средний износ угольных вставок составил 13,5 мм на 10^4 км, а металлоуглеродных — 5,3 мм на 10^4 км. Анализ состояния контактных поверхностей показал, что металлоуглеродные повреждались электрическими разрядами в меньшей степени. Средний пробег полозов токоприемников электровозов ЧС2 с металлоуглеродными вставками фирмы Hoffmann на Московской железной дороге составил 50–70 тыс. км, в то время как у угольных вставок отечественного производства — 20–40 тыс. км.

Убедительные результаты, подтверждающие преимущество металлоуглеродных вставок, были получены

**Показатели контактных вставок (при температуре 300° С)
 Indicators of contact strips (at the temperature of 300° С)**

Марка	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	Теплопроводность, Вт/(м·°К)	Теплоемкость, кДж/(кг·°К)	Коэффициент линейного расширения, 10^{-6} 1/К	Относительное удлинение, %
А	30	28	0,70	3,1	0,23
Б	15	26	0,71	3,0	0,22
О	8	24	0,75	3,8	0,28
Металлоуглеродные	8	42	0,85	5,0	0,34

ны и при испытании опытных отечественных токосъемных элементов в зимний период на Мурманском отделении Октябрьской железной дороги. Удельный износ на 10^3 км у опытных образцов ниже в 2,5–3 раза, чем у угольных вставок. У металлоуглеродных вставок на основе углеродного материала марки МПГ-7 износ составил 7,0–7,88 мм на 10^3 км, а у вставок марки Б — 22,76 мм.

Экономический эффект от использования металлоуглеродных вставок за счет увеличения сроков службы вставок и контактного провода, снижения случаев разрушений, уменьшения электропотерь при токосъеме прогнозируется по сети железных дорог до 840,9 млн руб. в год, а ожидаемая величина эффекта в расчете на один электровоз — до 84 тыс. руб. в год.

Выводы. 1. Приближение контактного провода и токосъемных элементов полоза токоприемника к достижению симметричного электрического контакта достигается путем металлизации углеродных вставок по технологии их пропитки медью. Такие вставки показали высокую дугостойкость и износостойкость.

2. В связи с различной мощностью электроподвижного состава, разными скоростями движения на участках переменного и постоянного тока, в различных климатических условиях в каждом отдельном случае следует использовать определенный вид токосъемных элементов.

3. Результаты исследований и опытная эксплуатация показали, что при высокой токовой нагрузке от 1200 до 1800 А экономически целесообразно использование в полозах токоприемников исключительно медноуглеродных вставок, при меньших токах до 1050 А — чисто углеродных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Biesenack H., Pintscher F. Kontakt zwischen Fahrdrabt und Schleifleiste – Ausgangspunkte zur Bestimmung des elektrischen Verschleißes. EB: Elektrische Bahnen. 2005. № 3. S. 138–146.
2. Берент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2005. 408 с.

3. Hayoz P., Wili U., Rogler R.-D., Kitzrow G., Pupke F. Fahrdrabtschäden in Strecken-trennungen – Härte und Zugfestigkeit. EB: Elektrische Bahnen. 2014. № 4. S. 207–213.

4. Auditeau G. A high-intensity carbon for pantographs. Revue Générale des Chemins de fer. 2010. № 200. P. 9–19.

5. Купцов Ю.Е., Хлопков М.В. Способы увеличения срока службы контактного провода: экспресс-информация // Электрификация и электрическое хозяйство. М.: ЦНИИТЭИ МПС, 1972. Вып. 5. С. 18.

6. Берент В.Я. Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем). М.: Аналитика Родис, 2016. 328 с.

7. Альтман А.Б., Быстрова Э.С. К вопросу о структуре износостойчивых электрических контактов // Электрические контакты: сб. М.: Госэнергоиздат, 1958. С. 214–223.

8. Францевич И.Н. Материалы электрических контактов: лекции Всесоюзной школы по электрическим контактам и электродам. Ч. 1 / АН УССР. Инст. проблем материаловедения. Киев, 1969. 120 с.

9. Теодорович О.К., Дьяченко И.М., Кацалуха С.А. Композиционные электроконтактные материалы и экономическая эффективность их применения / Укр. НИИТИ. Киев, 1973. 85 с.

10. Альтман А.Б., Мелашенко И.П., Быстрова И.С. Современные электрокерамические контакты // Электрические контакты: сб. М.: Госэнергоиздат, 1958. С. 171–185.

11. Мелашенко И.П. Материалы для электрических коммутирующих контактов // Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю.В. Крицкого. М.: Энергия, 1976. С. 473–499.

12. Францевич И.Н., Теодорович О.К. Металлокерамические контакты // Электрические контакты: сб. М.: Госэнергоиздат, 1958. С. 186–199.

13. Белкин Г.С., Данилов И.М. Исследование особенности электрической эрозии металлокерамических материалов // Электричество. 1972. № 8. С. 63–66.

14. Auditeau G., Arronsart S., Courtois Ch., Krötz W. Carbon contact strip materials – Testing of wear. EB: Elektrische Bahnen. 2014. № 4. S. 207–213.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕРЕНТ Валентин Янович, д-р техн. наук, научный консультант, научно-консультационный центр, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 02.02.2017 г., актуализирована 14.04.2017 г., принята к публикации 10.05.2017 г.

Prospectivity of application of metal-carbon contact strips for current collection on Russian railways

V. Ya. BERENT

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. The article considers the experience of using contact strips from carbon materials in slides of current collectors of electric locomotives with the purpose of reducing the wear of both the contact wire and the current collectors themselves. The electrical contact made of copper and carbon materials from which the strips are made is not symmetrical due to the large differences in their physical properties. In connection with this, when collecting high

currents, the carbon strips are intensively heated, causing softening of the contact wire and its electroerosive wear. It is proposed to reduce the intensity of these phenomena by approximating the electrical contact to symmetry. Approximation to the symmetrical electrical contact of the wire and the slide of the current collector was achieved by metallization of the carbon strips. The most effective insert samples are made by the technology of impregnation of the

carbon matrix with copper. Such strips showed high arc resistance and wear resistance as a result of bench tests and operational tests.

Experimental operation of electric locomotives with various types of strips was carried out when working on the sections of the Murmansk branch of the October Railway on a constant and then alternating current basis. Numerous studies and operational experience have shown that with a high current load from 1200 to 1800 A, it is economically feasible to use exclusively copper-carbon strips, with lower currents up to 1050 A – purely carbon ones.

Keywords: Metal-carbon strips; coal strips; strips of natural graphite; symmetrical electrical contact; non-symmetrical electrical contact; wear; electric erosion; electric arc; temperature; current decrease in contacts

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-174-180>

REFERENCES

1. Biesenack H., Pintscher F. *Kontakt zwischen Fahrdrabt und Schleifleiste – Ausgangspunkte zur Bestimmung des elektrischen Verschleißes*. EB: Elektrische Bahnen, 2005, no. 3, pp. 138–146.
2. Berent V. Ya. *Materialy i svoystva elektricheskikh kontaktov v ustroystvakh zheleznodorozhnogo transporta* [Materials and properties of electrical contacts in railway transport devices]. Moscow, Intext Publ., 2005, 408 p.
3. Hayoz Patrick, Wili Urs, Rogler Ralf-Dieter, Kitzrow Gerd, Pupke Frank. *Fahrdrabtschäden in Strecken-trennungen – Härte und Zugfestigkeit*. EB: Elektrische Bahnen, 2014, no. 4, pp. 207–213.
4. Auditeau Gérard. *A high-intensity carbon for pantographs*. Revue Générale des Chemins de fer, 2010, no. 200, pp. 9–19.
5. Kuptsov Yu. E., Khlopkov M. V. *Sposoby uvelicheniya sroka sluzhby kontaktного проводa*. Ekspress-informatsiya. Elektrifikatsiya i elektricheskoe khozyaystvo [Ways of increasing the service life of the contact wire. Express information. Electrification and electrical economy]. Moscow, TsNIITEI of MPS Publ., 1972, no. 5, 18 p.
6. Berent V. Ya. *Sil'notochnyy skol'zyashchiy kontakt (svoystva, povrezhdaemost' i protsessy, protekayushchie v nem)* [High-current sliding contact (properties, damage and processes occurring in it)]. Moscow, Analitika Rodis Publ., 2016, 328 p.
7. Al'tman A. B., Bystrova E. S. *K voprosu o strukture iznosostoychivyykh elektricheskikh kontaktov*. Elektricheskije kontakty.

Sb. [On the structure of wear-resistant electrical contacts. Electrical contacts. Coll.]. Moscow, Gosenergoidat Publ., 1958, pp. 214–223.

8. Frantsevich I. N. *Materialy elektricheskikh kontaktov*. Lektsii Vsesoyuznoy shkoly po elektricheskim kontaktam i elektrodam. Ch. 1 [Materials of electrical contacts. Lectures of the All-Union School of Electrical Contacts and Electrodes. Part 1]. Kiev, AN USSR, Inst. problem materialovedeniya [Institution on material science] Publ., 1969, 120 p.

9. Teodorovich O. K., D'yachenko I. M., Katsalukha S. A. *Kompozitsionnye elektrokontaktnye materialy i ekonomicheskaya effektivnost' ikh primeneniya* [Composite electrocontact materials and cost-effectiveness of their application]. Kiev, Ukr. NIITI Publ., 1973, 85 p.

10. Al'tman A. B., Melashenko I. P., Bystrova I. S. *Sovremennye elektrokeramicheskie kontakty*. Elektricheskije kontakty. Sb. [Modern electroceramic contacts. Electric contacts. Coll.]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1958, pp. 171–185.

11. Kritskiy Yu. V., Melashenko I. P. *Materialy dlya elektricheskikh kommutiruyushchikh kontaktov*. Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam [Materials for electrical commutating contacts. Handbook of electrotechnical materials]. Moscow, Energiya [Energy] Publ., 1976, pp. 473–499.

12. Frantsevich I. N., Teodorovich O. K. *Metallokeramicheskie kontakty*. Elektricheskije kontakty. Sb. [Metallokeramic contacts. Electrical contacts. Coll.]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1958, pp. 186–199.

13. Belkin G. S., Danilov I. M. *Issledovanie osobennosti elektricheskoy erozii metallokeramicheskikh materialov* [Investigation of the peculiarity of electric erosion of metal-ceramic materials]. Elektrichestvo [Electricity], 1972, no. 8, pp. 63–66.

14. Auditeau Gérard, Arronsart Stephane, Courtois Christian, Krötzer Werner. *Carbon contact strip materials – Testing of wear*. EB: Elektrische Bahnen, 2014, no. 4, pp. 207–213.

ABOUT THE AUTHOR

Valentin Ya. BERENT,

Dr. Sci. (Eng.), Scientific Consultant, Scientific Consultancy Center, JSC “VNIIZhT”

Received 02.02.2017

Revised 14.04.2017

Accepted 10.05.2017

■ E-mail: val.berent@yandex.ru (V. Ya. Berent)

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Берент В. Я. Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем). М.: ООО «АНАЛИТИКА РОДИС», 2016. 328 с.

Рассмотрены процессы, протекающие в материалах сильноточного скользящего контакта при их взаимодействии, а также свойства различных электротехнических медных сплавов применительно к проводам контактной сети электрифицированных железных дорог. Проведена классификация дефектов и повреждений контактных проводов и токосъемных элементов ползцов токоприемников в эксплуатации. Показана перспективность использования нанотехнологии для изготовления проводов и токосъемных элементов ползцов из медных дисперсно-упрочненных композитов

и сделано технико-экономическое обоснование целесообразности использования новых разработок.

Книга предназначена для использования в работе специалистами служб электрификации и локомотивного хозяйства ОАО «РЖД», а также может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.

Влияние новой конструкции щеткодержателей на эксплуатационный ресурс щеток тяговых электродвигателей электровозов

Д. Н. ХОМЧЕНКО

Открытое акционерное общество «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»), Москва, 107174, Россия

Аннотация. К числу многочисленных причин, оказывающих влияние на износ щеток, следует отнести геометрическую конфигурацию контактной поверхности «щетка — коллектор». В статье проанализированы факторы, сопутствующие измененной конфигурации щетки, такие как плотность тока и нагрев в щетке новой конструкции, дано сравнение областей безыскровой работы тяговых электродвигателей со штатными и опытными щеткодержателями. Приведены результаты эксплуатационных испытаний на Северо-Кавказской железной дороге электровоза ВЛ80с № 1676, один из тяговых двигателей которого был оснащен опытными щеткодержателями. Сделаны выводы. На примере новой конфигурации щеточного контакта показано, что щеточный контакт, а именно его конструкция и геометрические размеры, оказывает существенное влияние на характер коммутации тока в коллекторных тяговых электродвигателях.

Ключевые слова: коллекторная электрическая машина; коммутируемые секции обмотки якоря; искрение щеток

Актуальность темы исследований. При организации движения поездов повышенной массы и длины и проведении работ по совершенствованию элементов и узлов подвижного состава необходимо позаботиться и о тяговых электродвигателях (ТЭД), которые уже на этапе проектирования планировались как высоконапряженные электрические машины, активные части которых эксплуатируются на пределе своих возможностей (по индукции в магнитной системе, плотности тока в обмотках, температуре нагрева). При увеличении веса поездов на сложном профиле пути режимы перегрузки могут затягиваться во времени, приближая к предельно допустимой температуре нагрева изоляцию ТЭД и ухудшая условия коммутации.

Межгосударственным стандартом ГОСТ 2582–2013 [1] ресурс работы ТЭД определен как: «Срок службы электрической машины или ее узлов по результатам испытаний или работы в эксплуатации до определенного вида ремонта или до предельного износа, по достижении которого эксплуатация запрещается». На ресурс работы ТЭД наиболее сильное влияние оказывают: износ коллектора и щеток, подшипниковых узлов, изоляции. В данной статье рассматривается

одна важная компонента износа узлов и деталей ТЭД: износ щеток.

Качество коммутации ТЭД в значительной мере определяет работоспособность электрического подвижного состава и расходы на его эксплуатацию. Замена щеток, проточка коллектора и последующая обработка его рабочей поверхности — весьма трудоемкие и дорогостоящие операции. Уже на ранних стадиях изучения коммутационных процессов в коллекторных двигателях было определено, что на износ щеток, кроме множества других факторов, влияет конфигурация контактной поверхности «щетка — коллектор» [2, 3]. Этот фактор достоин особого внимания по той причине, что можно достаточно быстро и без существенных затрат изготовить и установить на ТЭД щеткодержатели практически с любой конфигурацией щеток, не изменяя при этом присоединительных и установочных размеров щеткодержателя.

Новое техническое решение. По итогам предварительного анализа научных публикаций по коммутационному процессу в электрических машинах постоянного тока в [4] была предложена конструкция щеткодержателя для ТЭД, изображенная на рис. 1. Такие щеткодержатели установлены в ТЭД пульсирующего тока НБ-514Б, (электровозы 2ЭС5К «Ермак») и ТЭД НБ-418К (электровозы ВЛ80).

Конструкция отличается от штатного щеткодержателя уменьшенным тангенциальным размером двух крайних щеток (рис. 1). Их размер уменьшен на толщину одной коллекторной пластины. Щетки такого размера соответствуют ГОСТ 12232–89 [5] и выпускаются отечественной электропромышленностью. Тангенциальный размер штатной щетки 24 мм, а усовершенствованной — 20 мм. Поскольку средняя щетка является штатной, то коммутационный путь секции остается прежним. Часть коммутационного пути секции размером в половину коллекторного деления средняя щетка пройдет одна, следовательно начало и завершение коммутационного пути секции будет происходить в электрической цепи с большим активным сопротивлением, чем в штатном щеткодержателе.

Основным аргументом в пользу такой конструкции послужила идея О. Г. Вегнера [2], развитая впо-

■ E-mail: dmitrij-khomchenko@yandex.ru (Д. Н. Хомченко)

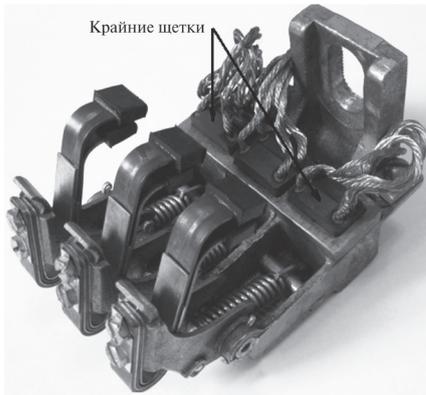


Рис. 1. Щеткодержатель с измененными крайними щетками
Fig. 1. Brush holder with modified outer brushes

следствии Р. М. Девликамовым [6], о необходимости заблаговременно установить ток секции равным току в параллельной ветви якоря, в которую она вступает, благодаря чему секция подготавливается к безыскровому размыканию в реальных условиях неустойчивости контакта у сбегающей части щетки. Таким образом, при оценке условий искрообразования следует исходить из условий обстановки разрыва остаточного тока и особенностей протекания заключительной фазы коммутационного процесса [2]. Так появилось понятие, введенное О. Г. Вегнером, «ступень малого тока», которое по смыслу представляет собой пологий участок в конце кривой тока коммутации секций.

Обоснование положительного эффекта от нового технического решения. Сравним предложенный новой вариант контактной поверхности щетки с тем, что используется в настоящее время в штатном режиме с позиций классической теории коммутации Е. Арнольда.

В классической теории коммутации полагается, что переходные сопротивления «щетка — коллектор» в каждый момент времени обратно пропорциональны контактными площадкам соприкосновения щеток и коллекторных пластин. Также предполагается в пределах контактной площадки равномерное распределение тока. Для такого вида коммутации, еще его называют коммутацией сопротивлением, при равенстве нулю реактивной электродвижущей силы (ЭДС) и активных сопротивлений секции и петушков коллекторных пластин (соединительных звеньев между концами секций якорной обмотки и пластинами коллектора) классическая теория дает соотношение между током коммутируемой секции i и током якоря i_a для простой петлевой обмотки в следующем виде [7]:

$$i = \frac{r_{щ2} - r_{щ1}}{r_{щ2} + r_{щ1}} i_a, \quad (1)$$

где $r_{щ1}$ и $r_{щ2}$ — сопротивления щеточного контакта между щеткой и пластинами коллектора для случая, когда тангенциальный размер щетки равен коллекторному делению. При вращении коллектора $r_{щ1}$ и

$r_{щ2}$ являются функциями времени, так как в каждый момент времени меняются контактные площадки соприкосновения щеток и коллекторных пластин.

При указанных выше допущениях сопротивления щеточного контакта во времени записываются в виде следующих формул [7]:

$$r_{щ1} = \frac{T_k}{T_k - t} r_{щ}, \quad r_{щ2} = \frac{T_k}{t} r_{щ}, \quad (2)$$

где T_k — период коммутации; t — текущее время; $r_{щ}$ — активное сопротивление щеточного контакта, когда щетка точно совмещена с одной коллекторной пластиной: $щ2$ — набегающая на пластину щетка, $щ1$ — сбегающая с пластины щетка.

После подстановки выражений (2) в формулу (1) получается зависимость (3), которая представляет собой прямую линию, и этот тип коммутации называют прямолинейной.

$$i = \left(1 - \frac{2t}{T_k}\right) i_a. \quad (3)$$

При перекрытии щеткой нескольких (например, пяти, как в двигателях пульсирующего тока НБ-514Б и НБ-418К) пластин коллектора коммутация является также прямолинейной [7] на сбегающем и набегающем краях щеток. Сравним коммутацию сопротивлением при штатной щетке двигателя НБ418К и при усовершенствованной щетке. Контактные поверхности щеток показаны на рис. 2.

Для того чтобы воспользоваться формулой (2) в случае с двигателями НБ-514Б и НБ-418К, разделим коммутационный путь секции, например, на двадцать участков и определим активное сопротивление щеточного контакта в начале каждого участка. Это будут узловые точки. Промежуточные точки могут быть получены с помощью метода кусочно-линейной аппроксимации. Для упрощения аппроксимации функциональной зависимости контактного сопротивления щетки от положения относительно коллектора, чтобы не использовать бесконечно большое число, принято допущение: в момент, предшествующий соприкосновению щетки и коллекторной пластины, контактное сопротивление не равно бесконечности, а в 20 раз больше случая полного перекрытия щеткой коллекторной пластины. Принимаем во внимание обратно пропорциональную зависимость контактного сопротивления контактирующей поверхности коллекторных пластин и щетки от ее площади, как это трактуется в классической теории коммутации. Как следствие, если за единицу взять контактное сопротивление одной коллекторной пластины, перекрытую щеткой $r_{щ}$, то при штатных и усовершенствованных щетках процесс изменения контактного сопротивления на сбегающей щетке и набегающей щетке в узловых точках представлен соответственно в таблице.

Изменение (в относительных единицах) контактного сопротивления, контактирующей поверхности коллекторных пластин и щетки при штатном щеткодержателе (числитель) и при щеткодержателе новой конструкции (знаменатель)
 Change (in relative units) of contact resistance, contacting the surface of collector plates and a brush with a standard brush holder (numerator) and with a new holder (denominator)

Значение изменения контактного сопротивления, о.е.	Номер участка коммутационного пути секции (узловые точки)															
	1	2	3	4	5	6	7	...	14	15	16	17	18	19	20	
$r_{щ}$ набегающей щетки	20/20	4/12	2/6	1,41/2,4	1/1,5	1/1,2	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	
$r_{щ}$ сбегающей щетки	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1,2	1/1,5	1,41/2,4	2/6	4/12	20/20	

На рис. 3 изображена зависимость активного сопротивления контактной площадки с коллекторной пластиной усовершенствованной 1 и штатной 2 щеток при движении их по коллектору в пределах коммутационного пути секции. По отношению к штатной щетке у усовершенствованной активное сопротивление при ее движении изменяется более медленно. Подставим полученные зависимости $r_{щ1}$ и $r_{щ2}$ штатной и усовершенствованной щеток в формулу (1), графический результат изображен на рис. 4.

Если следовать логике О. Г. Вегнера [2], то из кривых коммутации секции (рис. 4) следует, что секция в случае с щеткодержателем новой конструкции подготавливается к безыскровому размыканию в реальных условиях неустойчивости контакта у сбегающей части щетки лучше, чем при штатном щеткодержателе, особенно учитывая механические факторы. Влияние механических факторов на взаимодействие щетки и поверхности коллектора ТЭД проявляется в изменении приложенного давления на щетку со стороны пальцев щеткодержателя. Согласно ГОСТ 2582–81 при опорно-осевой подвеске ТЭД величина максимальных динамических ускорений от внешних механических факторов может достигать $22g$, где g — ускорение свободного падения. Снижение давления на щетку приводит к росту удельного контактного сопротивления и падения напряжения под щеткой.

При некоторых условиях сбегающая щетка под действием механических факторов может потерять нормальный контакт с коллектором чуть раньше, чем включиться в следующую параллельную ветвь якоря. Это и есть различие между действительным и расчетным периодом коммутации секции. Принимая во внимание механические факторы коммутационного процесса, коммутационный путь секции может завершиться немного раньше расчетного (например, линия $a-b$, рис. 4), и при щеткодержателе новой конструкции ток разрыва будет почти в четыре раза меньше. Под током разрыва здесь понимается разность между током параллельной ветви якоря, в которую вступает коммутируемая секция, и током самой коммутируемой секции. В идеальном случае, если этой разницы в токах нет, то коммутация будет безыскровой [2].

В отличие от ускоренной коммутации пологий участок в кривой тока коммутации имеется не только в конце коммутационного цикла, но и в его начале. В реальных условиях эксплуатации это уменьшит степень искрения и износ щеток.

Если исключить ранее принятые допущения о равенстве нулю реактивной ЭДС и активных сопротивлений секции и петушков, то кривая тока коммутации изменится, в основном под влиянием реактивной ЭДС. Однако роль активного сопротивления контактной площадки в момент входа секции в коммутационный процесс и выхода из него безусловно останется и будет положительной.

Рассмотрим другие факторы, сопутствующие измененной конфигурации щетки. Это, прежде всего, увеличенная плотность тока, которая обратно пропорциональна контактной поверхности щетки. Известно, что увеличивая плотность тока в щеточном контакте до определенной степени, можно добиться улучшения условий коммутации и снижения износа щеток. В данном случае ток выполняет функцию «смазки» в физических процессах, проходящих на нануровне между коллектором и щеткой при вращении коллектора. Имеется довольно обширный экспериментальный материал, доказывающий этот факт. На рис. 5 изображены кривые износа щеток в зависимости от плотности тока и частоты вращения якоря ТЭД, заимствованные из [8]. Из рисунка видно, что оптимальная плотность тока для критерия степени износа щеток существенно зависит от частоты вращения якоря

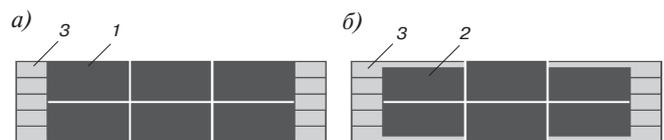


Рис. 2. Схема расположения щеток 1 (штатной) и 2 (с уменьшенным тангенциальным размером) на коллекторе 3: a — в штатном щеткодержателе с контактной поверхностью щеток 2304 мм²; b — в щеткодержателе новой конструкции с контактной поверхностью щеток 1920 мм²
 Fig. 2. The arrangement of brushes 1 (standard) and 2 (with reduced tangential size) on the collector 3: a — in a standard brush holder with a contact surface of brushes 2304 mm²; b — in the brush holder of a new design with a contact surface of brushes of 1920 mm²

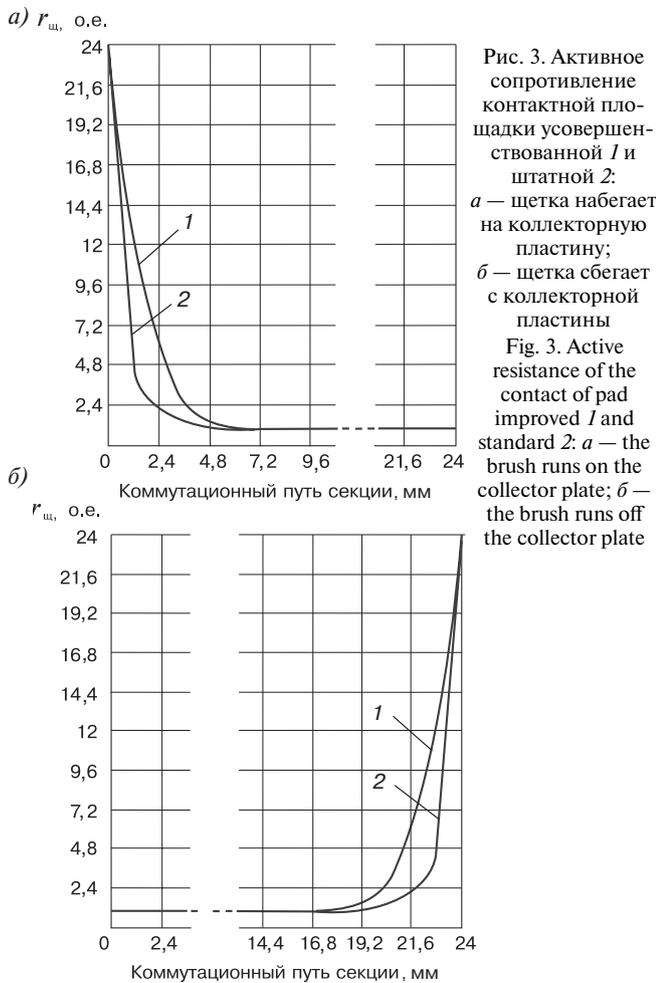


Рис. 3. Активное сопротивление контактной площадки усовершенствованной 1 и штатной 2:
 а — щетка набегает на коллекторную пластину;
 б — щетка сбегает с коллекторной пластины
 Fig. 3. Active resistance of the contact of pad improved 1 and standard 2: а — the brush runs on the collector plate; б — the brush runs off the collector plate

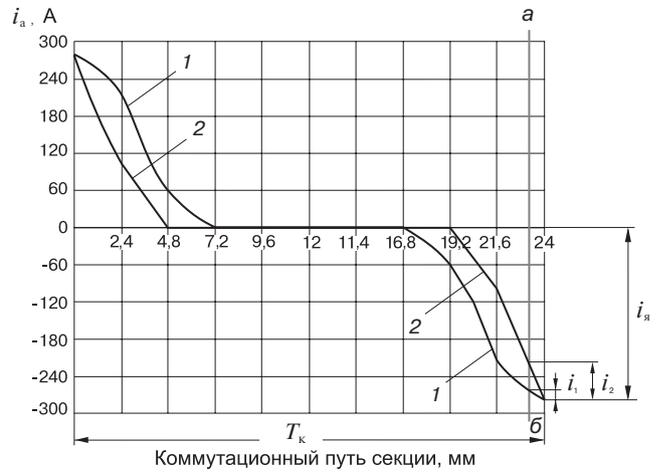


Рис. 4. Кривые тока в коммутируемой секции:
 1 — с усовершенствованными щетками; 2 — со штатными щетками; линия а–б — момент времени возможного сокращения реального периода коммутации по отношению к расчетному; i_1 — ток разрыва с усовершенствованными щетками; i_2 — ток разрыва со штатными щетками
 Fig. 4. Current curves in the switched section: 1 — with improved brushes; 2 — with standard brushes; line а–б — moment of time possible reduction of the real switching period in relation to the calculated; i_1 — breaking current with enhanced brushes; i_2 — rupture current with standard brushes

и с ростом частоты вращения оптимальная плотность тока имеет тенденцию к повышению. В [3] указано, что «рекомендуемая нормативно-техническими документами плотность тока в щетках имеет меньшие значения, чем определенная из условия минимума полных потерь. Поэтому существует принципиальная возможность повышения плотности тока в контакте за счет уменьшения суммарной контактной площади щеток, устанавливаемых в машине».

Увеличенная плотность тока в щетках новой конструкции также требует ответа на вопрос о тепловом состоянии щеток. Расчетным путем получить ответ с удовлетворительной точностью является затруднительным по причине значительного влияния внешних факторов на процесс нагрева щеток, учесть которые сложно. Однако имеются [3] экспериментальные исследования влияния плотности тока на нагрев щеток, где при испытаниях генератора постоянного тока с увеличенной на 50% плотностью тока изменения температуры не вызвало. По данным [9], при эксплуатации мощных электрических машин с уменьшенным по сравнению с проектным количеством установленных на них щеток каких-либо ухуд-

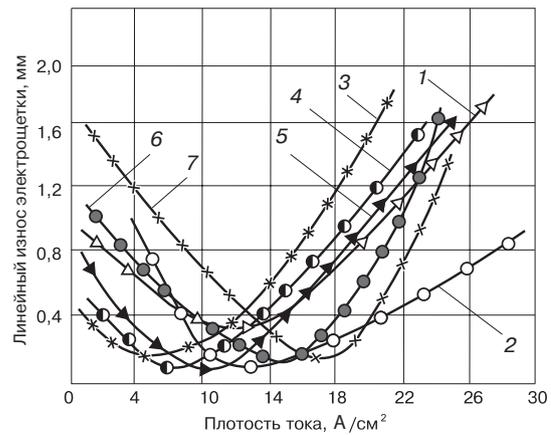


Рис. 5. Экспериментальная зависимость линейного износа щеток от плотности тока:
 линейные скорости: 1 — 11,8 м/с; 2 — 17,42 м/с; 3 — 23,2 м/с; 4 — 29 м/с; 5 — 34,8 м/с; 6 — 40,6 м/с; 7 — 46,4 м/с
 Fig. 5. Experimental dependence of the linear wear of brushes on the current density: 1 — 11,8 м/с; 2 — 17,42 м/с; 3 — 23,2 м/с; 4 — 29 м/с; 5 — 34,8 м/с; 6 — 40,6 м/с; 7 — 46,4 м/с

шений в работе машины не зафиксировано, а в отдельных случаях улучшалось состояние поверхности коллектора (политура) и уменьшалась скорость изнашивания щеток.

Таким образом, можно ожидать, что увеличение плотности тока в щеточном контакте в номинальном продолжительном режиме работы ТЭД НБ-514Б с 11,7 на 14,1 А/см² не ухудшит условия коммутации и не увеличит износ щеток, скорее реальное действие будет положительным.

Рассмотрим еще один фактор — область безыскровой работы (ОБР), который необходимо проанализировать при измененной конфигурации щеток для выяснения степени влияния на искровой износ щеток электромагнитных и механических факторов. Экспериментальные данные по определению ОБР тягового электродвигателя НБ-514Б с щеткодержателями новой конструкции (далее «опытными») были сравнены с аналогичными данными электродвигателя НБ-514Б со штатными щеткодержателями. Испытания со штатными и опытными щеткодержателями были проведены на стенде ОАО «ВЭЛНИИ» (протокол испытаний ЭМА-АТ-55-2015). На рис. 6 представлены ОБР при штатных и опытных щеткодержателях.

Сравнение приведенных на рис. 6 ОБР опытных щеткодержателей и ОБР штатных щеткодержателей показывает, что их ширина не сильно отличается, если принять во внимание, что на практике даже у однотипных двигателей со всеми штатными компонентами ОБР в точности не совпадают. В приведенных ОБР различие составляет тот факт, что при подпитке дополнительных полюсов с опытными щеткодержателями верхняя кривая ОБР с ростом тока нагрузки не только не сужается, как со штатными щеткодержателями, но и несколько возрастает. Следовательно, влияние электромагнитных факторов на износ щеток примерно одинаково, за исключением режимов с большими нагрузками, где предпочтительны опытные щеткодержатели [10].

Для проверки эффективности работы опытных щеткодержателей в условиях эксплуатации, они были смонтированы на тяговом электродвигателе электровоза ВЛ80с № 1676 приписки эксплуатационного локомотивного депо Батайск. Эксплуатационные испытания были согласованы с Дирекцией по ремонту тягового подвижного состава и Дирекцией тяги — филиалами ОАО «РЖД».

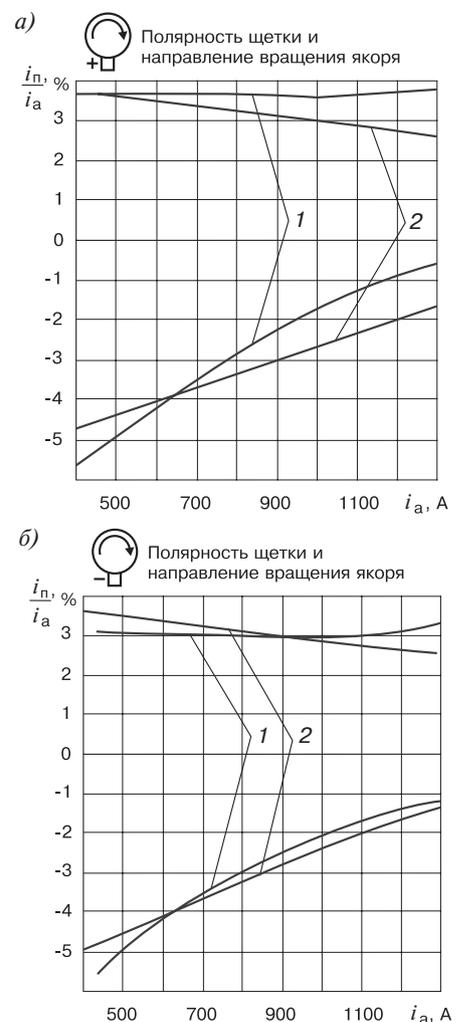
Пробег электровоза за период эксплуатационных испытаний составил 35982 км. Электровоз осуществлял эксплуатационную работу на Северо-Кавказской железной дороге на участках, где встречались значительные подъемы до 12‰. Согласно данным программы АСУТ-Т-ЮГ, электровоз эксплуатировался с поездами средней массой 4026 т, максимальной 7271 т. Поезда с массой 6000 т и выше составили 40 %.

После проведения испытаний и демонтажа щеток был измерен радиальный размер всех щеток, который характеризует их износ. Опытные щеткодержатели обеспечили снижение износа щеток в среднем на 48 %.

Уменьшение износа щеток в процессе эксплуатации ТЭД с опытными щеткодержателями связано в основном со снижением влияния на искрение механических факторов, так как в процессе эксплуатации под влиянием механических факторов сбегаящие края щеток подвержены вибрации. При этом обрывается значительный ток, который вызывает

Рис. 6. Область безыскровой работы при усовершенствованных 1 и штатных 2 щетках для степени искрения 1¼ для одного направления вращения: а — на щетке с потенциалом «плюс»; б — на щетке с потенциалом «минус»; i_a — ток якоря; i_n — ток подпитки дополнительных полюсов

Fig. 6. The area of sparking with improved 1 and regular 2 brushes for a degree of sparking 1¼ for one direction of rotation: а — on a brush with the potential "plus"; б — on a brush with potential "minus"; i_a — armature current; i_n — additional poles feeding current



повышенный искровой износ щеток. Однако при опытной конструкции щеткодержателей из-за того, что в кривой тока коммутации присутствует пологий участок, на стадии завершения коммутационного процесса происходит обрыв меньшего тока, чем при штатных щеткодержателях, этим и объясняется снижение искрового износа от влияния механических факторов.

Выводы. 1. Щеточный контакт, а именно его конструкция и геометрические размеры, оказывает существенное влияние на характер коммутации тока в ТЭД. Целенаправленно изменяя параметры щеток, можно заметно улучшить качество коммутации ТЭД.

2. Эксплуатационные испытания опытной партии щеткодержателей показали, что при внедрении на электровозах с коллекторными ТЭД новых конструктивных решений по токосъемному узлу возможно улучшить условия коммутации и существенно снизить расход щеток, что важно для обеспечения работоспособности ТЭД локомотивов на руководящих подъемах и при вождении поездов повышенной массы и длины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2582–2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 56 с.
2. Вегнер О. Г. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. М.: Госэнергоиздат, 1961. 272 с.
3. Лившиц П. С. Щетки электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1989. 80 с.
4. Щеткодержатель: патент на полезную модель № 2548908 Российской федерация, МПК H01R39/40 / А. Д. Петрушин, Р. М. Девликамов, Д. Н. Хомченко. № 2014103301; заявл. 31.01.2014; опубл. 20.04.2015. Бюл. № 11. 4 с.
5. ГОСТ 12232–89. Щетки электрических машин. Размеры и методы определения переходного электрического сопротивления между щеткой и токоведущим проводом и определение усилия вырывания токоведущего провода. М.: Изд-во стандартов, 1992. 51 с.
6. Девликамов Р. М. Новые элементы теории токосъема с коллектора и рекомендации по их использованию на практике. М.: Маршрут, 2011. 221 с.

7. Вольдек А. И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
8. Коротков В. М. Систематизация процесса токопрохождения в электрическом скользящем контакте тягового электродвигателя // Вестник РГУПС. 2014. № 3. С. 105–109.
9. May M. S. Current density in carbon brushes ay. *Electrical Engineering*. 1962. Vol. 81. № 3. P. 208–209.
10. Хомченко Д. Н., Черешенко А. Е. Новая конструкция щеткодержателей для электровозов постоянного и переменного тока // Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса юга России: тр. междунар. науч.-практич. конф. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2015. Ч. 1. С. 244–247.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ХОМЧЕНКО Дмитрий Николаевич,
начальник технической службы,
Дирекция тяги — филиал ОАО «РЖД»

Статья поступила в редакцию 30.03.2017 г., принята к публикации 22.05.2017 г.

Influence of a new design of brush holders on the service life of traction electric motor brushes of electric locomotives

D. N. KHOMCHENKO

Joint Stock Company "Russians Railways" (JSC "RZD"), Moscow, 107174, Russia

Abstract. The article is devoted to the solution of the actual task of improving the current collector unit of collector traction electric motors of electric locomotives, which currently constitute the overwhelming majority of electric vehicles of the electric rolling stock of Russia. Based on the classical theory of commutation and using O.G. Wegner's idea on the need to establish in advance the current of the switched section equal to the current in the parallel branch of the armature into which it enters, the justification is given for the application of a new design of the sliding contact for collectors of traction motors. The article analyzes the factors accompanying the changed configuration of the brush, such as the current density and heating in a new designed brush, and also reviews comparison of areas of sparkless operation of traction motors with standard and experienced brush holders. Also, the results of operational tests on the North Caucasian Railway of the VL80 electric locomotive no. 1676 are shown, one of the traction engines of which was equipped with experienced brush holders. Experienced brush holders provided a significant reduction in brush wear. On the basis of the conducted studies, it was concluded that the decrease in wear of brushes during the operation of the engine with experienced brush holders is mainly due to a decrease in the influence of mechanical factors on the sparking. During operation, under the influence of mechanical factors, the running edges of the brushes are subject to vibration, and significant current breaks off, which cause an increased spark wear of the brushes. Using the example of a new brush contact configuration, it is shown that the brush contact, namely its design and geometric dimensions, has a significant effect on the nature of current commutation in collector traction motors.

Keywords: collector electric machine; switching sections of armature windings; brush sparking

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-181-186>

REFERENCES

1. ГОСТ 2582–2013. *Electric rotating traction machines. General specifications*. Moscow, Standardinform Publ., 2014, 56 p. (in Russ.).
2. Vegner O. G. *Teoriya i praktika kommutatsii mashin postoyannogo toka* [Theory and practice of commutating DC machines]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1961, 272 p.

3. Livshits P.S. *Shchetki elektricheskikh mashin* [Brushes of electric machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 80 p.
4. Petrushin A. D., Devlikamov R. M., Khomchenko D. N. *Brush holder: patent for utility model no. 2548908*, Russian Federation, IPC H01R39/40, no. 2014103301, 04.20.2015. Bul. no. 11, 4 p. (in Russ.).
5. ГОСТ 12232–89. *Brushes of electric machines. Dimensions and methods for determining the transient electrical resistance between a brush and a current-carrying wire and determining the pulling force of a current-conducting wire*. Moscow, Publishing house of standards, 1992, 51 p. (in Russ.).
6. Devlikamov R. M. *Novye elementy teorii tokos'ema s kolektora i rekomendatsii po ikh ispol'zovaniyu na praktike* [New elements of the theory of current collection from the collector and recommendations for its use in practice]. Moscow, Marshrut Publ., 2011, 221 p.
7. Vol'dek A. I. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Saint-Petersburg, Energiya [Energy] Publ., 1974, 840 p.
8. Korotkov V. M. *Sistemizatsiya protsessa tokoprokhozhdeniya v elektricheskoy skol'zayemyy kontakte tyagovogo elektrodvigatelya* [Systematization of the current transmission process in the electric sliding contact of the traction motor]. Vestnik RGUPS, 2014, no. 3, pp. 105–109.
9. May M. S. *Current density in carbon brushes ay*. *Electrical Engineering*. 1962. Vol. 81, no. 3. pp. 208–209.
10. Khomchenko D. N., Chereshenko A. E. *Novaya konstruktsiya shchetkoderzhateley dlya elektrovozov postoyannogo i peremennogo toka* [A new design of brush holders for electric locomotives of direct and alternating current]. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Perspektivy razvitiya i effektivnost' funktsionirovaniya transportnogo kompleksa yuga Rossii. Ch.1. [Proc. of the International Scientific and Practical Conference. Prospects for Development and Efficiency of the Transport Complex of the South of Russia. Part 1]. Rostov-on-Don, RGUPS Publ., 2015, pp. 244–247.

ABOUT THE AUTHOR

Dmitriy N. KHOMCHENKO,
Director of Engineering Service, Directorate of traction —
branch of the JSC "RZD"

Received 30.03.2017

Accepted 22.05.2017

■ E-mail: dmitrij-khomchenko@yandex.ru (D. N. Khomchenko)

Моделирование вибродемпфирующих свойств упруговязкопластических слоев земляного полотна. Постановка задачи 1

В. М. БЕЛЬКОВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. Настоящая статья посвящена постановке задачи и разработке модели вибродемпфирующих свойств земляного полотна на основной площадке подошвы балластной призмы нормированной толщины, защитной песчаной подушки и глинистых грунтов в условиях воздействия гармонических колебаний на базе физико-химической механики.

При анализе взаимодействия вагона и железнодорожного пути обычно используют тело Кельвина — Фойгта и земляное полотно представляют как некую приведенную сосредоточенную массу, участвующую в колебаниях со шпалами и рельсами. Но эта модель неприменима для слоистых систем, не имеющих сосредоточенных масс. Подобные задачи можно решать только с использованием теории волновых процессов.

Ключевые слова: вибродемпфирование; земляное полотно; упруговязкопластические свойства; гармонический анализ; вертикальные вибрационные волны

Введение. При движении грузового поезда на нижнее строение пути в диапазоне частот 4–10 000 Гц действуют гармонические силы [1], воздействующие на упруговязкопластические свойства дисперсных слоев, состав граничных зон и их динамику. Как показано в работах [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], в поле гармонических напряжений нарушение устойчивости границы раздела двух сред с различной структурной вязкостью происходит вначале на неоднородностях границы: в местах с повышенным напряжением и большей пористостью слоя щебня, песка или суглинка. Причем среда с меньшей структурной вязкостью, т. е. песок, проникает в поровое пространство щебня, а суглинок или глина в поровое пространство слоя песка. Это существенно уменьшает локальную структурную вязкость щебня или песка, и, в конечном счете, приводит к заполнению порового пространства менее вязкой средой с образованием переходной области и, как следствие, снижению несущей способности песчаного и глинистого оснований [2]. Далее на построочной основной площадке (границе раздела накопленных балластных и дренирующих материалов и глинистых грунтов земляного полотна) вследствие пластических деформаций образуются балластные углубления — корыта и ложа. Влажность глинистых грунтов в местах с этими углублениями в 1,2...1,3 раза больше, чем

для ровной площадки. Из-за повышенной влажности происходят просадки пути, в том числе с выдавливанием разжиженного глинистого грунта, возникают пучины, проявляются сплывы и оползания откосных частей насыпей [9, 10].

Постановка задачи моделирования. При анализе взаимодействия вагона и железнодорожного пути обычно используют тело Кельвина — Фойгта (рис. 1) [11, 12] и земляное полотно представляют как некую приведенную сосредоточенную массу, участвующую в колебаниях со шпалами и рельсами.

Однако, как следует из выше рассмотренного и работы [13], тело Кельвина — Фойгта относится к приближенным моделям, не раскрывающим физические механизмы взаимодействия верхнего строения пути с земляным полотном. Слоистые системы не имеют сосредоточенных масс, отличаются различными акустическими свойствами и отражением вибрационных волн на границе раздела слоистой системы. За счет отражения на границе раздела в каждом слое амплитуда и поглощение энергии гармонических колебаний будут свои, отличные от начальной амплитуды смещения рельсов. Кроме того, для возникновения колебаний в суглинке необходимо, чтобы под ним находилась среда, отражающая вертикальную продольную волну, иначе обратная полуволна не сформируется, а компрессионная волна уйдет вглубь и превратится в итоге в тепло. То есть подобные задачи можно решать только с использованием теории волновых процессов.

Построим модель устойчивости системы «глинистые грунты — защитный песчаный слой — щебеночная балластная призма» в условиях воздействия гармонических колебаний с частотным спектром 4–250 Гц [14] в соответствии с изложенными выше положениями физико-химической механики [13] для различных свойств песчаного слоя и глинистого основания.

В настоящее время механизм возбуждения вибрации в грунтах изучен недостаточно детально, в частности процессы генерации вторичных волн сыпучими средами. Так, спектральная плотность силы, возникающей при воздействии колесных пар на верхнее строение пути, зависит от состояния поверхностей

■ E-mail: belkov.vladimir@vniizht.ru (В. М. Бельков)

качения колес и рельса, систем рессорного подвешивания вагона, характеристик пути и его основания, скорости движения поезда, профиля рельса, качества рихтовки пути и его кривизны на месте проведения испытания и от других факторов. Оценка уровней виброускорения расчетным путем представляет собой достаточно сложную задачу. В дополнение к математическим трудностям проблема осложняется отсутствием достоверных данных о геометрических характеристиках и упругих свойствах слоев грунта. Обычно данные о геологическом строении района в окрестности железнодорожной линии получают на основе анализа проб грунта при бурении, но количество пробуренных скважин ограничено и поэтому упругие свойства грунта определяются приблизительно. Иногда имеются данные о таких величинах, как модуль упругости, структурная вязкость по статическим характеристикам, а информация об их динамических параметрах на практике не известна. В «Руководстве по определению физико-механических характеристик балластных материалов и грунтов земляного полотна» (ЦПИ-36) [10] к физико-механическим характеристикам отнесены следующие статические характеристики: 1) гранулометрический (зерновой) состав балластных материалов и грунтов земляного полотна; 2) характеристики засоренности щебня балластного слоя; 3) плотность балластных материалов и грунтов земляного полотна; 4) пористость и коэффициент пористости балластных материалов и грунтов земляного полотна; 5) максимальная плотность и оптимальная влажность накопленных балластных материалов; 6) влажность глинистых грунтов на границе раскатывания и границе текучести; 7) число пластичности; 8) подверженность морозному пучению, величина и интенсивность морозного пучения грунтов земляного полотна; 9) угол внутреннего трения и удельное сцепление для балластных материалов и грунтов земляного полотна; 10) упругая осадка грунтов подшпального основания; 11) вибродинамические характеристики грунтов земляного полотна (прочностные и деформативные свойства глинистых грунтов при вибродинамических воздействиях) и ряд других важных технологических характеристик. А динамические характеристики сред — скорость распространения волны, показатель и коэффициент потерь, коэффициент Пуассона в Руководстве [10] не приводятся.

В настоящей статье используются физико-механические свойства грунтов, приведенных в Своде правил по проектированию и строительству «Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена» СП 23–105–2004 [15]. Для расчета вибрационных полей в Своде правил применяются зависимости из линейной теории волновых процессов.

Передача вибрационной волны или статических и динамических сил, которые возникают от проходящего поезда и действуют вертикально по оси Z от рельса через резиновую прокладку на шпалу, а далее через подошву шпалы на щебень на границе $Z=0$ (поверхность контакта шпалы со щебнем), — достаточно сложный процесс. Сила, воздействующая на шпалу, имеет квазипостоянную составляющую, модулируемую суммарной гармонической кривой с частотным спектром 4–250 Гц [14].

В области подшпального основания возникает нестационарная интерференция, увеличивающая амплитуду тензора напряжения в местах контакта шпалы и щебня. Диссипация энергии продольной волны вибрации вдоль пути, представленная на рис. 1, по оси X в сыпучем минеральном материале под шпалой заключается в разрушении кристаллической решетки острых граней и выступов на поверхности щебня и в основном определяется формой гранул, количеством на них острых выступов, плотностью упаковки и степенью загрязнения, понижающей структурную вязкость щебня. График зависимости амплитуды деформационной волны в плоскости $Z-X$, исходящей от шпалы, для каждого слоя щебня представляет собой приблизительно плоскую волну сжатия (рис. 2). Между шпалами амплитуда плоской деформационной волны уменьшается и за счет взаимодействия граней щебеночного камня преобразуется в сдвиговые и поперечные волны, которые распространяются вдоль оси движения вагонов X и от соседних шпал практически полностью компенсируются. Переменные напряжения вдоль оси Y , перпендикулярной оси X , приводят к дроблению гранул и возникновению дефектов упаковки за счет сдвигов щебеночного камня к боковым поверхностям призмы и ее уширению. Образующаяся мелкая фракция из-за вибрации сыпается и сосредотачивается в нижней части щебеночной призмы. По мере засорения пылевидными грузами и песком пористость щебеночной призмы падает.

Устойчивость насыпи в системе глинистые грунты — двухслойная призма из щебня и песчаной подушки в целом определяется по вертикальному профилю снизу вверх стабильностью границ «суглинок — слой песка» и «песчаный слой — слой щебня». Движущийся поезд возбуждает вибрации грунта из-за возникновения динамических сил между колесом и рельсом, обусловленных в основном ударными нагрузками при колебаниях колес тележек и их отрывом от рельсов. В интервале эксплуатационной скорости движения поездов от 30 до 110 км/ч спектр вибрации, передаваемой слою щебня, сосредоточен в частотном диапазоне 4–250 Гц [14].

При прохождении состава на рельсы и шпалу воздействует квазипостоянная составляющая силы нагрузки, а при приближении колес к шпалам и наезде

на них начинает действовать переменная составляющая. В результате шпала достигает максимального смещения в сторону грунта, а при съезде колеса переменная составляющая силы нагрузки уменьшается. Вертикальная сила возбуждает в шпале вертикальную продольную волну: вдоль оси X — продольную и поперечную волны из-за объемного сжатия сегмента под резиновой прокладкой, а вдоль оси Y — также продольную и поперечную волны, направленные к концам шпал. Вертикальная продольная волна частично отражается от границы «шпала — щебень», и меньшая по амплитуде ее часть проходит в щебень.

Напряжение сжатия, проходящее через резиновую прокладку, возбуждает в материале шпалы вертикальную продольную волну, и на криволинейной границе «шпала — щебень» одномерный тензор напряжения T_z переходит в трехмерный $T_{x,y,z}$ (рис. 1). Волна в областях шпалы, контактирующей с гранулами щебня, переходит в области контакта в щебеночный материал. Волна напряжений сжатия в местах, где отсутствует плотный контакт подошвы шпалы со щебнем, отражается на границе «шпала — воздух» и в противофазе взаимодействует с набегающей вибрационной волной, практически полностью ее компенсируя. В результате материал бетонной шпалы будет испытывать локальные знакопеременные изгибные деформации по своей длине и ширине.

Объемные напряжения в области шпалы под резиновой прокладкой будут генерировать продольные и поперечные волны по осям X и Y , которые, отражаясь от границы «бетон — воздух», практически полностью компенсируют друг друга. В области шпалы между резиновыми прокладками по оси Y также происходит компенсация продольных и поперечных волн, которые генерируются колебаниями вагона в плоскости $X-Z$. Эти волны в плоскости $Y-Z$ также компенсируются практически полностью благодаря отражению от торца шпалы. Таким образом, волновой процесс распространения деформаций и смещений можно считать одномерным и происходящим в основном вдоль оси Z .

Вторичные вибрационные, продольные и сдвиговые волны, которые генерируются в сыпучих материалах, представляют собой шум в частотном диапазоне от 4 до 150 Гц [14, 16]. Но амплитуда вторичных вибрационных волн меньше амплитуды основных волн, возникающих при наезде на шпалы колес проходящих вагонов.

В рамках одномерной задачи можно получить точное решение в виде суперпозиции аналитических функций, что удобно для анализа и разработки методических рекомендаций выбора оптимальной конструкции пути для конкретного грунта. В волновой одномерной задаче (рис. 3) рассмотрим составной резонатор: «рельс — резиновая накладка — шпала — слой щебня — песчаная подушка — глинистый грунт», позволяющий учесть отражение волны от границ разде-

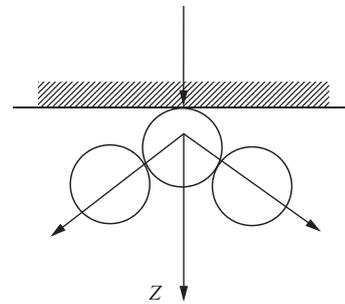


Рис. 1. Схематическое изображение эффекта «расширения» площадки приложения тензора напряжений для гексагональной упаковки
Fig. 1. Schematic representation of the "expansion" effect of the stress tensor application area for hexagonal packing

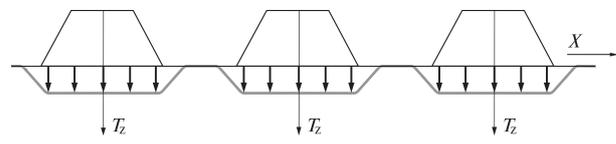


Рис. 2. Вид волны деформации, исходящей от шпалы.
 T_z — напряжение, действующее вглубь грунта по направлению к оси Z
Fig. 2. The form of the deformation wave coming from the sleeper.
 T_z — the stress acting deep into the ground in the direction of the Z axis

ла и диссипацию энергии в различных слоях. Предполагается также, что толщина слоев составного резонатора значительно меньше поперечных размеров и все точки в некоторой плоскости, параллельной плоскости подошвы рельса, движутся с одинаковыми амплитудами и в одной и той же фазе. Исходя из принципа суперпозиции волн суммарная волна деформации, распространяющаяся в среде, равна сумме волн деформации всех волн системы.

При воздействии сильных продольных волн на сыпучий материал из-за трения частиц друг о друга генерируется широкополосный спектр вторичных гармоник [16, 17, 18] за счет энергии основной волны, что приводит к увеличению коэффициента поглощения и уменьшению амплитуды основной деформационной волны. На рис. 4 изображены результаты экспериментов, проведенных В. А. Куликовым (ИГФ СО РАН) по измерению показателей поглощения сильных продольных волн в разных материалах. Автором наблюдалась существенная нелинейность поведения продольных волн: расплывание и амплитудно-зависимое затухание, пропорциональное первой степени частоты. Как отмечено в работе [16], это и есть переходный процесс от одного закона взаимодействия частиц (модифицированного закона Герца), характеризующегося малыми деформациями и «сухим» трением, к другому закону, который характеризуется сверхмалыми деформациями на уровне атомного размера и большей скоростью распространения. А это приводит к дополнительному перекачиванию энергии в область сверхнизких частот, пропорциональному первой степени

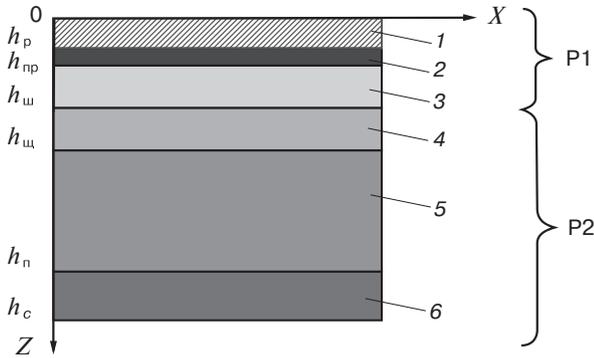


Рис. 3. Схематическое изображение слоистой системы:
 1 — рельс; 2 — подкладка; 3 — шпала; 4 — щебень; 5 — песчаная подушка; 6 — суглинок; P1, P2 — резонаторы
 Fig. 3. Schematic representation of a layered system:
 1 — rail; 2 — pad; 3 — sleeper; 4 — crushed ballast; 5 — sand cushion; 6 — loam; P1, P2 — resonators

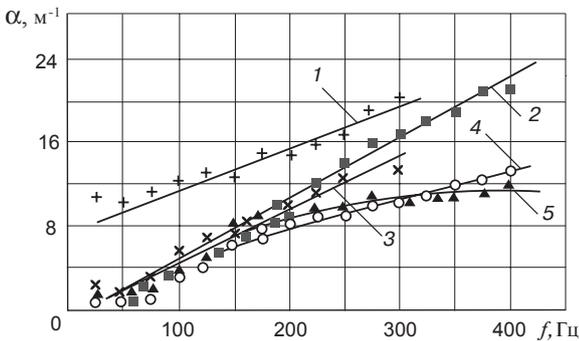


Рис. 4. Показатели поглощения α_i продольных волн в различных материалах: 1 — стружечно-плиточная смесь; 2 — влажный песок; 3 — рыхлый сухой грунт; 4 — мелкий щебень; 5 — крупный щебень [15]
 Fig. 4. Absorption coefficients α_i of longitudinal waves in various materials: 1 — chip-slab mix; 2 — wet sand; 3 — loose dry soil; 4 — fine crushed stone; 5 — large crushed stone [15]

частоты, и существенной нелинейности распространения высокочастотных гармоник. И, следовательно, по нашему мнению, к возможным автоколебаниям слоистой среды.

Коэффициенты поглощения продольных вибрационных волн в Своде правил по проектированию и строительству [15] определяли в трехоктавных диапазонах со среднегеометрическими частотами 16, 31,5, 63 Гц. Поэтому их величины ближе к поставленной задаче, чем показатели поглощения α_i в работе [16], найденные при микровзрывах, т. е. когда исходный импульс имеет длительность десятки микросекунд, а измеренные α_i относятся к вторичным волнам, продольным и поперечным, возникающим при внутреннем трении в материале, рассеянии на неоднородностях и интерференции. Экспериментальные данные из [16] тем не менее свидетельствуют о том, что гармоники с частотой более 100 Гц поглощаются в слое крупного щебня из-за инерционности его гранул (кривая 5, рис. 4).

Модельные уравнения. В сформулированных выше приближениях для гармонических колебаний с угло-

вой скоростью ω уравнение распространения плоских продольных вибрационных волн в слоях из металла и бетона, а также плотно упакованного щебня и сухого песка при наиболее плотной гексагональной упаковке, будет иметь вид [19]

$$E_i \frac{d^2 u_{zi}}{dZ^2} - \rho_i \frac{\partial^2 u_{zi}}{\partial \tau^2} = 0;$$

$$v_{zi} = \sqrt{\frac{3K_i + 4G_i}{3\rho_i}} = \sqrt{\frac{E_i(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_i}};$$

$$G_i \frac{d^2 u_{yi}}{dZ^2} - \rho_i \frac{\partial^2 u_{yi}}{\partial \tau^2} = 0;$$

$$G_i \frac{d^2 u_{xi}}{dZ^2} - \rho_i \frac{\partial^2 u_{xi}}{\partial \tau^2} = 0; \quad v_{x,yi} = \sqrt{\frac{G_i}{\rho_i}}, \quad (1)$$

где u_i — функция упругого смещения; K_i , ρ_i — модуль всестороннего сжатия среды i -го слоя и ее плотность; E_i — модуль Юнга среды; ν — коэффициент Пуассона; G_i — модуль сдвига среды i -го слоя; z — координата, нормальная поверхности подошвы шпалы; x — координата, совпадающая с направлением движения; y — координата, перпендикулярная координате x ; τ — время; v_i — фазовая скорость волны смещения в i -ом слое.

Для пористых материалов (песок, щебень, глина) расчет волновых характеристик проводят по (1), но вместо ρ_i в уравнении (1) подставляют величину [20]

$$\rho_i^* = \rho_i(1-\beta), \quad (2)$$

где β — пористость материала.

Волны по осям X и Y отражаются от границ раздела в горизонтальных плоскостях и рассеиваются, поэтому их сумма практически равна 0. В соответствии с вышесказанным система уравнений (1) вырождается в

$$E_i \frac{d^2 u_i}{dZ^2} - \rho_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial \tau^2} = 0; \quad v_i = \sqrt{\frac{E_i(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_i}}. \quad (3)$$

В соответствии с общей теорией упруговязких материалов под действием напряжения, зависящего от времени, для слоев резиновой подкладки, щебня, песка и суглинка уравнения плоских продольных волн имеют вид [19, 21]

$$E_i^* \frac{d^2 U_i}{dZ^2} - \rho_i \frac{\partial^2 U_i}{\partial \tau^2} = 0; \quad v_i = \sqrt{\frac{|E_i^*|}{\rho_i}}; \quad Z_i = \rho_i v_i;$$

$$E_i^* = E_i' + E_i''; \quad |E_i^*| = \sqrt{E_i'^2 + E_i''^2}; \quad E_i'' = \omega \eta_{ct};$$

$$\operatorname{tg} \delta_i = \frac{E_i''}{E_i'}; \quad E_i^* = |E_i^*| (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) = |E_i^*| e^{-j\delta_i}. \quad (4)$$

В уравнении (4): E_i^* — комплексный модуль упругости упруговязкого i -го слоя; U_i — функция упруговязкого смещения с диссипацией энергии в резиновой прокладке и слоях щебня, песка и суглинка; Z_i — импеданс среды; E_i' — модуль объемной упругости; E_i'' — мо-

доль потерь; ω — частота гармонического напряжения; $\eta_{ст}$ — структурная вязкость среды; δ_i — угол сдвига фаз между напряжением и скоростью деформации.

Для чисто упругого материала $\delta_i = 0$, $|E_i^*| = E_i'$, для сред со свойствами ньютоновской жидкости $\delta_i = \pi/2$, $|E_i^*| = \omega\eta_{ст}$. Решения уравнений (1) и (4) с учетом отражения от границ имеют вид [19, 20, 21, 22]

$$u_i = Re(A_i e^{j(\omega\tau - k_i z)} + B_i e^{j(\omega\tau + k_i z)}) = A_i^0 e^{-\frac{\omega\eta_i z}{v_i}} \sin(\omega\tau - k_i z) + B_i^0 e^{\frac{\omega\eta_i z}{v_i}} \sin(\omega\tau + k_i z); \quad (5)$$

$$U_i = Re(C_i e^{j(\omega\tau - \Gamma_i z)} + D_i e^{j(\omega\tau + \Gamma_i z)}) = C_i^0 e^{-\frac{\omega\eta_i z}{v_i}} \sin(\omega\tau - k_i z + \delta_i) + D_i^0 e^{\frac{\omega\eta_i z}{v_i}} \sin(\omega\tau + k_i z + \delta_i), \quad (6)$$

где $k_i = \omega/v_i$ — волновое число; A_i, C_i, B_i, D_i — комплексные коэффициенты падающей и отраженной от границы волны соответственно; η_i — коэффициент поглощения амплитуды в i -ом слое, безразмерная величина; Γ_i — постоянная распространения в i -ом слое, определяется из уравнения [21]

$$\Gamma_i = j\omega \frac{1}{v_i} = j\omega \sqrt{\frac{\rho_i}{E_i^*}} = j\omega \sqrt{\frac{\rho_i}{|E_i^*|}} e^{j\frac{\delta_i}{2}} = \alpha_i + j\gamma_i = \frac{\omega}{v_i} (tg \frac{\delta_i}{2} + j); \quad \alpha_i = \gamma_i tg \frac{\delta_i}{2}; \quad \gamma_i = \frac{\omega}{v_i}; \quad \alpha_i = \frac{\omega\eta_i}{v_i}. \quad (7)$$

В выражениях (7) δ_i — угол потерь в материале i -го слоя; γ_i — модуль вязкоупругости или комплексное волновое число среды; α_i — показатель поглощения или затухания амплитуды волны частотой ω [22].

Выводы. 1. При анализе взаимодействия вагона и железнодорожного пути земляное полотно представляют как некую приведенную сосредоточенную массу, участвующую в колебаниях со шпалами и рельсами. Но эта модель принципиально неприменима для слоистых систем. Кроме того, для возникновения колебаний в суглинке необходимо, чтобы под ним находилась среда, отражающая вертикальную продольную волну. Иначе обратная полуволна не сформируется, а компрессионная волна уйдет вглубь и превратится в итоге в тепло.

2. За счет отражения на границе раздела слоистой системы в каждом слое амплитуда и поглощение энергии гармонических колебаний будут свои, отличные от начальной амплитуды смещения рельсов. То есть подобные задачи можно решать только с использованием теории волновых процессов.

3. Ввиду отражения деформационных волн от внешних поверхностей шпалы (торцов, боковых поверхностей) и их компенсации задача моделирования сводится к одномерной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коншин Г.Г. Вибрационный метод диагностики насыпей // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 10. С. 22–25.

2. Бельков В.М., Антипов Б.В. Физико-химические основы устойчивости пути // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 12. С. 21–24.

3. Рыбкина О.В. Об устойчивости движения границ раздела двух вязкопластических жидкостей // Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва: тезисы докладов Всероссийской конф., 17–22 сентября 2007 г. Новосибирск, 2007. С. 54–57.

4. Иванцов А.О. Численное исследование осредненных эффектов воздействия высокочастотных поступательных вибраций на неоднородные гидродинамические системы: автореф. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05. Пермь, 2009. 25 с.

5. Бельков В.М., Шатов А.А. Математическая модель капиллярной пропитки пористых сред вязкопластическими жидкостями // Коллоидный журнал. 1992. Т. 54. № 3. С. 16–20.

6. Belkov V.M. Meniscus Shape of Visco-Plastics Liquid in Capillaries // Proceedings of Conf. Wetting and Self-Organization in Thin Liquid Film, 18–21 Sept., 1995, Konstans, Germany.

7. Бельков В.М. Динамика пропитки пористых сред при перепаде давления // Журнал физической химии. 1996. Т. 70. № 3. С. 549–554.

8. Бельков В.М., Теплякова Е.А. Динамика миграции нефтепродуктов во влажных почвогрунтах // Проблемы железнодорожного транспорта, задачи и пути их решения: сб. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2012. С. 207–215.

9. Дыдышко П.И., Шарапов С.Н. Защитные слои подрельсового основания // Вестник ВНИИЖТ. 1998. № 4. С. 23–27.

10. ЦПИ-36. Руководство по определению физико-механических характеристик балластных материалов и грунтов земляного полотна: утв. Департаментом пути и сооружений 30.01.2004.

11. Трофимович В.В. Динамика электроподвижного состава: методические указания. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. 39 с.

12. Рубан В.Г., Матва А.М. Решение задач динамики железнодорожных экипажей в пакете Mathcad: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2009. 99 с.

13. Бельков В.М. Моделирование упруговязкопластических свойств земляного полотна. Постановка задачи 1 // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 6. С. 334–338.

14. Комкин А.И. Вибрация, воздействие, нормирование, защита // Приложение к журналу «Безопасность жизнедеятельности». 2004. № 5. С. 1–41.

15. СП 23–105–2004. Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена. Свод правил по проектированию и строительству: утв. постановлением Госстроя России № 20 от 09.03.2004.

16. Куликов В.А., Сибиряков Е.Е. Распространение сильных волн в неоднородных сыпучих средах // Динамика сплошной среды. Акустика неоднородных сред. Новосибирск: ИГИЛ СО РАН, 2003. Вып. 121. С. 103–110.

17. Назаров В.Е., Радостин А.В. Амплитудная модуляция звука звуком // Акустический журнал. 2011. Т. 57. № 5. С. 596–599.

18. Сибиряков Е.Б. Зависимость между коэффициентом Пуассона и микроструктурой микрооднородной среды // Физическая мезомеханика. 2004. Вып. 7. № 1. С. 63–67.

19. Мэзон У. Распространение упругих волн в жидкостях и твердых средах. Физическая акустика. М.: Мир, 1966. Ч. 1А. 589 с.

20. Соловьянинов И.П., Шабурин С.Н. Теория волновых процессов. Акустические волны: учеб. пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. 308 с.

21. Филиппов В. Релаксация в растворах полимеров, полимерных жидкостях и гелях // Физическая акустика / под ред. У. Мезона. М.: Мир, 1969. Ч. 2Б. С. 9–109.

22. Литовиц Т., Девис К. Свойства газов, жидкостей и растворов // Физическая акустика / под ред. У. Мезона. М.: Мир, 1968. Ч. 2А. С. 298–370.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛЬКОВ Владимир Максимович, д-р физ.-мат. наук, научный консультант НКЦ, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 03.06.2016 г., актуализирована 30.10.2016 г., принята к публикации 17.11.2016 г.

Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 1

V. M. BEL'KOV

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. The present article is devoted to the formulation of the problem and the development of a model for the vibration damping properties of the roadbed at the base of the ballast prism's bottom of normalized thickness, a protective sand cushion and clayey soils under the influence of harmonic oscillations based on physical and chemical mechanics. When analyzing the interaction between the car and the railway, typically the Kelvin—Voigt body is used and the roadbed is represented as a certain adjusted concentrated mass participating in vibrations with sleepers and rails. But this model is inapplicable for layered systems that do not have, in principle, concentrated masses. Such problems can only be solved using the theory of wave processes. In addition, for the occurrence of oscillations in loam it is necessary to have a medium under it reflecting the vertical longitudinal wave. Otherwise, the reverse half-wave will not form, and the compression wave will go deeper and turn into heat in the end. Due to the reflection at the interface of the layered system in each layer, the amplitude and absorption of the energy of the harmonic oscillations will be different from the initial displacement amplitude of the rails. That is, such problems can be solved only using the theory of wave processes. In view of the reflection of deformation waves from the outer surfaces of the sleepers (faces, side surfaces) and their compensation, the task of modeling becomes a one-dimensional.

Keywords: vibration damping; roadbed; elastic-viscoplastic properties; harmonic analyses; vertical oscillating waves

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-187-192>

REFERENCES

1. Konshin G.G. *Vibratsionnyy metod diagnostiki nasypov* [Vibration method of diagnosing embankments]. Put' i putevoe khozyaystvo [Railway Track and Facilities], 2007, no. 10, pp. 22–25.
2. Bel'kov V.M., Antipov B.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy ustoychivosti puti* [Physicochemical basis of the track stability]. Put' i putevoe khozyaystvo [Railway Track and Facilities], 2013, no. 12, pp. 21–24.
3. Rybkina O.V. *Ob ustoychivosti dvizheniya granits razdela dvukh vyazkoplasticheskikh zhidkostey* [On the stability of the motion of interfaces between two viscoplastic fluids]. Tezisy dokladov Vserossiyskoy konferentsii "Problemy mekhaniki sploshnykh sred i fiziki vzryva", 17–22 sentyabrya 2007 g. [Abstracts of the All-Russian Conference Problems of Continuum Mechanics and Explosion Physics, September 17–22, 2007]. Novosibirsk, 2007, pp. 54–57.
4. Ivantsov A.O. *Chislennoe issledovanie osrednennykh effektov vozdeystviya vysokochastotnykh postupatel'nykh vibratsiy na neodnorodnye gidrodinamicheskie sistemy*. Kand. fiz.-mat. nauk diss. avtoref. [Numerical investigation of averaged effects of high-frequency translational vibrations on heterogeneous hydrodynamic systems. Cand. phys.-math. sci. diss. synopsis]. Perm', 2009, 25 p.
5. Bel'kov V.M., Shatov A.A. *Matematicheskaya model' kapillyarnoy propitki poristykh sred vyazkoplasticheskimi zhidkostyami* [A mathematical model of the capillary impregnation of porous media by viscoplastic fluids]. Kolloidnyy zhurnal [Colloid Journal], 1992, Vol. 54, no 3, pp. 16–20.
6. Bel'kov V.M. *Meniscus Shape of Visco-Plastics Liquid in Capillaries*. Proceedings of Conf. Wetting and Self-Organization in Thin Liquid Film, 18–21 Sept., 1995, Konstanz, Germany.
7. Bel'kov V.M. *Dinamika propitki poristykh sred pri perepade davleniya* [Dynamics of impregnation of porous media at a pressure drop]. Zhurnal fizicheskoy khimii [Journal of Physical Chemistry], 1996, Vol. 70, no. 3, pp. 549–554.
8. Bel'kov V.M., Teplyakova E.A. *Dinamika migratsii nefteproduktov vo vlazhnykh pochvogruntakh* [Dynamics of migration of petroleum products in moist soils]. Problemy zhelezнодорожного transporta, zadachi i puti ikh resheniya. Sb. tr. OAO "VNIIZhT"

[Problems of railway transport, tasks and ways to solve them. Proc. of JSC "VNIIZhT"]. Moscow, Intext Publ., 2012, pp. 207–215.

9. Dydyshko P.I., Sharapov S.N. *Zashchitnye sloi podrel'sovogo osnovaniya* [Protective layers of the under-rail base]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1998, no. 4, pp. 23–27.

10. TsPI-36. *Guidelines for the determination of physical and mechanical characteristics of ballast materials and soils of the roadbed*. Approved by the Department of roads and structures on 30.01.2004 (in Russ.).

11. Trofimovich V.V. *Dinamika elektropodvizhnogo sostava: metodicheskie ukazaniya* [Dynamics of an electric rolling stock: methodical instructions]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2007, 39 p.

12. Ruban V.G., Matva A.M. *Reshenie zadach dinamiki zheleznodorozhnykh ekipazhey v pakete Mathcad: ucheb.posobie* [Solving the problems of the dynamics of the railway crews in the Mathcad package: a training manual]. Rostov-on-Don, RGUPS Publ., 2009, 99 p.

13. Bel'kov V.M. *Modelirovanie uprugovyazkoplasticheskikh svoystv zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 1* [Modeling of elasto-viscoplastic properties of a roadbed. Statement of the problem 1]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2016, Vol. 75, no. 6, pp. 334–338.

14. Komkin A.I. *Vibratsiya, vozdeystvie, normirovanie, zashchita* [Vibration, impact, rationing, protection]. Prilozhenie k zhurnalu "Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti" [Supplement to the journal "Life safety"], 2004, no. 5, pp. 1–41.

15. SP 23–105–2004. *Assessment of vibration in the design, construction and operation of metro facilities. Code of rules for design and construction*. Approved by the Gosstroy of Russia no. 20 on 09.03.2004 (in Russ.).

16. Kulikov V.A., Sibiriyakov E.E. *Rasprostraneniye sil'nykh voln v neodnorodnykh sypuchikh sredakh* [Propagation of strong waves in inhomogeneous granular media]. Dinamika sploshnoy sredy. Akustika neodnorodnykh sred [Dynamics of a continuous medium. Acoustics of inhomogeneous media]. Novosibirsk, IGIL SO RAN Publ., 2003, no. 121, pp. 103–110.

17. Nazarov V.E., Radostin A.V. *Amplitudnaya modulyatsiya zvuka zvukom* [Amplitude sound modulation by sound]. Akusticheskiy zhurnal, 2011, Vol. 57, no. 5, pp. 596–599.

18. Sibiriyakov E.B. *Zavisimost' mezhdu koeffitsientom Puassona i mikrostrukturoy mikroneodnorodnoy sredy* [The relationship between the Poisson's ratio and the microstructure of a microinhomogeneous medium]. Fizicheskaya mezomekhanika [Physical mesomechanics], 2004, Vol. 7, no. 1, pp. 63–67.

19. Mezon U. *Propagation of elastic waves in liquids and in solid media*. Physical acoustics. Moscow, Mir Publ., 1966, Vol. 1A, 589 p.

20. Solov'yaninov I.P., Shaburin S.N. *Theory of wave processes. Acoustic waves*. Textbook. Ekaterinburg, GOU VPO UGTU–UPI Publ., 2004, 308 p.

21. Mezon U., Filippov V. *Relaxation in solutions of polymers, polymer liquids and gels*. Physical acoustics. Moscow, Mir Publ., 1969, Vol. 2B, pp. 9–109.

22. Mezon U., Litovits T., Devis K. *Properties of gases, liquids and solutions*. Physical acoustics. Moscow, Mir Publ., 1968, Vol. 2A, pp. 298–370.

ABOUT THE AUTHOR

Vladimir M. BEL'KOV,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Scientific Consultant of Science and consultancy center (NKTs), JSC "VNIIZhT"

Received 03.06.2016

Revised 30.10.2016

Accepted 17.11.2016