

А.М. Керопян, П.Я. Бибиков

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЯГОВЫХ КОЛЕС КАРЬЕРНЫХ ЛОКОМОТИВОВ С РЕЛЬСАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ РАБОТЫ

Приведен сравнительный анализ условий взаимодействия колес локомотива с рельсом при электрической и тепловозной тяге для карьерного железнодорожного транспорта. Дано описание условий, способствующих образованию мостиков сварки (схватывания) между микровыступами контактирующих поверхностей. Сделаны выводы о влиянии режимов взаимодействия колес локомотивов с рельсами на их тяговую способность.

Ключевые слова: колесо локомотива, рельс, электрическая тяга, тепловозная тяга, мостики сварки, шероховатые поверхности, температурный градиент, схватывание.

Контакт между реальными твердыми телами всегда имеет дискретный характер, а площадь фактической величины соприкасающихся поверхностей составляет незначительную часть от номинальной площади касания [1, 2, 3]. Данное положение вполне справедливо к условиям взаимодействия пары колесо – рельс железнодорожного транспорта, работа которой сопровождается упругим и геометрическим скольжением.

При относительном скольжении двух тел вследствие деформирования материалов, участвующих в образовании и разрушении фрикционных связей, происходит нагрев поверхностного слоя. При этом повышение

температуры приводит к местному поверхностному размягчению и расплавлению материала [1]. Тепло распространяется от пятен контактов вглубь обоих контактирующих тел, причем тепловые потоки распределяются в зависимости от теплофизических свойств контактирующих тел, их размеров и условий теплоотвода. Передача тепла происходит по направлению нормали к изотермической поверхности от мест с большей температурой к местам с более низкой температурой.

Наибольший перепад температуры происходит в направлении нормали к площади, образованной единичным выступом. На рис. 1 показано взаимодействие двух поверхностей и направ-

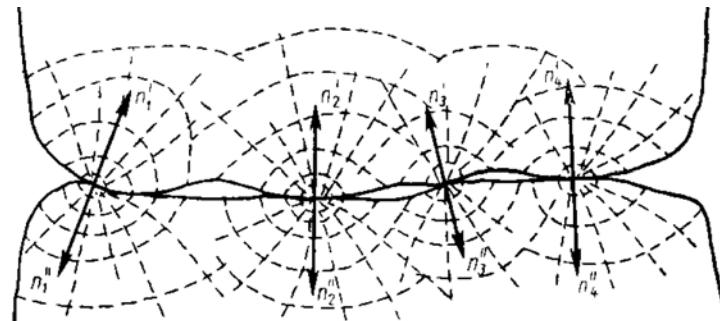


Рис. 1. Контактирование двух шероховатых поверхностей: n_1, n_2, n_3, n_4 – единичные нормали

ление единичных векторов, совпадающих с направлением нормали к единичной площадке контакта. Очевидно, в общем случае направление общей нормали n к контакту не совпадает с единичными векторами.

В реальном контакте колеса с рельсом участвуют два твердых тела, разделенных слоем дисперсного загрязнения. Все нормальные, тяговые и тормозные силы передаются от колеса к рельсу как через отдельные контакты, имеющие относительно небольшую площадь по сравнению с名义альной (кажущейся) площадью, между ними, так и через слой дисперсного загрязнения, заполняющий почти всю名义альную площадь контакта между колесом и рельсом. Поэтому, малейшие изменения механических свойств в поверхностном загрязнении оказываютя способными значительно влиять на сам результат трения и на изнашивание колес и рельсов, находящихся в реальных эксплуатационных условиях [4, 5]. Промежуточным «третьим телом», согласно определению И.В. Крагельского, в данном случае являются как выступы материала колеса и рельса, адсорбированные молекулы, так и разделяющий их слой полидисперсного загрязнения, состоящий из продуктов износа твердых тел, молекул газа и жидкой фазы в виде воды и смазки, заносимые извне под колеса поезда.

Качение колеса по рельсу непременно сопровождается скольжением, при этом трение скольжения двух шероховатых тел в точках соприкосновения сопровождается температурными вспышками, величина которых значительно превышает среднее значение температуры взаимодействующих поверхностей. Термовая модель взаимодействия колеса и рельса представлена на рис. 2 [2].

Для ясного представления физико-механических процессов, происходящих в зоне контакта системы колесо –

рельс, рассмотрим геометрические характеристики взаимодействующих поверхностей.

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к поверхности колес локомотивов, шероховатость поверхности катания ограничена $R_z = 80 \text{ мкм}$ (ГОСТ 9036-88). В процессе эксплуатации в результате приработки класс чистоты поверхности катания колеса становится ниже, т.е. до $160\text{--}320 \text{ мкм}$ [6]. Инструментальные измерения шероховатости приработанных поверхностей бандажей локомотивов дают более высокие значения параметра R_z .

Было бы логичным получить после приработки более гладкую поверхность катания, однако практика показывает обратное. Поэтому, для более полного представления физической сущности процессов, происходящих в зоне контакта системы колесо – рельс, рассмотрим их физико-химическую характеристику.

Поверхностный слой металла обладает большой активностью. Это связано с тем, что внутри твердого тела каждый атом кристалла окружен другими атомами и связан с ними прочно по всем направлениям, а у атомов, расположенных на поверхности, с внешней стороны нет «соседей» в виде таких же атомов. В связи с этим в поверхностном слое у атомов твердого тела

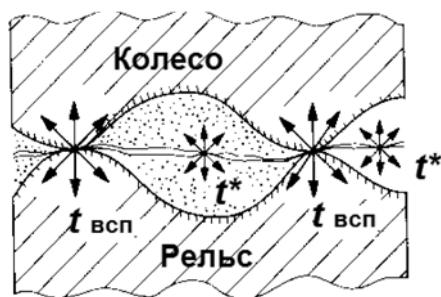


Рис. 2. Схема тепловой модели взаимодействия колеса и рельса: $t_{\text{всп}}$ – температура вспышки, t – средняя температура поверхности

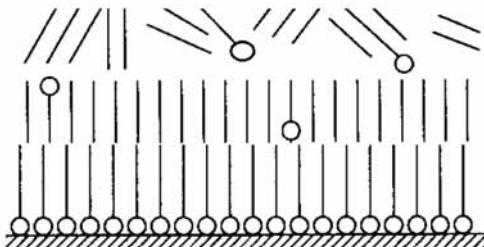


Рис. 3. Схема поверхностного слоя металла со свободными связями

остаются свободные связи, наличие которых создает вблизи поверхности атомное (молекулярное) притяжение. Чтобы при таком несимметричном силовом поле атом кристалла находился в равновесии, необходимо иное, чем внутри кристалла, расположение атомов самого верхнего слоя, рис. 3 [7].

Поверхностные атомы вследствие свободных связей обладают большей энергией, нежели атомы внутри твердого тела. Избыток энергии, отнесенный к единице поверхности, называют удельной поверхностной энергией или просто поверхностной энергией. Полная энергия кристалла состоит из внутренней и поверхностной энергий. Последняя пропорциональна поверхности раздела фаз, поэтому особенно возрастает при диспергировании твердых тел. Избыточная поверхностная энергия предопределяет также химическую активность поверхности твердого тела. При соприкосновении двух тел поверхностная энергия исчезает и может выделиться в виде теплоты или может быть потрачена на подстройку в кристаллической решетке одного кристалла к другому [7].

Эффективность работы локомотива характеризуется реализуемым коэффициентом сцепления в процессе фрикционного взаимодействия его колеса с рельсом. Взаимодействие колеса с рельсом в свою очередь зависит от множества факторов, таких как осевая нагрузка, погодные условия, геометрические параметры взаи-

модействующих поверхностей, выделяющаяся в зоне контакта мощность и температура, которые в свою очередь зависят от скорости движения локомотива и скорости скольжения колес локомотива относительно рельсов и т.д.

Поскольку на железных дорогах применяются электрическая и тепловозная тяги, рассмотрим особенности эксплуатации каждой из них.

При работе электровозов через контактные зоны колес и рельсов протекает тяговый электрический ток. Величина среднего тягового тока через фрикционный контакт каждого колеса и рельса достигает 150 А, при этом в зоне контакта системы колесо – рельс выделяется мощность, составляющая в среднем до 180 кВт/колесо [8, 9]. Этот тяговый ток проходит через зону контакта с контурной площадью в несколько десятков квадратных миллиметров, при этом площадь фактического контакта не превышает 1–10% от номинальной площади касания [13]. Существенно влияющим на устойчивость сцепных свойств локомотивов является полидисперсный слой загрязнений, постоянно находящийся между контактирующими поверхностями колеса и рельса, и имеющий в своей основе окиси железа, кремния, алюминия, и в незначительных количествах – кальций, серу, медь, марганец и никель. Эти загрязнения образуются частицами произвольной формы с весьма развитой поверхностью и по своей электропроводности являющиеся проводниками, полупроводниками и диэлектриками [2]. В связи с этим, наличие промежуточного слоя между бандажом колеса и головкой рельса оказывает влияние на электропроводные свойства контакта колеса и рельса, и, соответственно, на сцепные свойства электровоза [8, 12]. При этом сопротивление в зоне контакта увеличивается и, как следствие, повыш-

шается температура на контактирующих поверхностях.

Тепловая энергия, выделяемая в контакте колеса и рельса от прохождения тягового тока, определяется законом Джоуля Ленца

$$W_{\text{тяг.тока}} = I_{\text{кп}}^2 R_{K\Sigma} t,$$

где $I_{\text{кп}}$ – тяговый ток, проходящий через контактное пятно между одним колесом и рельсом, А, $R_{K\Sigma}$ – суммарное эквивалентное электрическое сопротивление пятна контакта между колесом и рельсом, Ом, t – время процесса, с.

В работах Н.Б. Демкина [3, 12] показано, что при контактном взаимодействии грубо обработанных поверхностей превалирующими являются пластические деформации. Причем пластиически деформируются в первую очередь выступы шероховатости контактирующих поверхностей. Поэтому наличие пластических деформаций, прохождение электрического тока и температурный фактор в зоне контакта системы колесо – рельс дают повод рассмотреть условия, при которых осуществляются процессы сварки.

Необходимым условием всех видов сварки давлением (контактная, диффузионная, холодная, трением и др.) является пластическая деформация металлов в зоне контакта соединяемых деталей. При сварке происходит принудительное образование межатомных связей между кристаллическими решетками соединяемых деталей. Основными параметрами технологического процесса при сварке давлением являются величина давления (деформация), температура нагрева, время сварки, а также величина и скорость взаимного перемещения свариваемым деталям и среда (состав газовой фазы), в которой происходит сварка [10].

В связи с тем, что контакт колеса с рельсом является дискретным, рассмотрим условия осуществления точечной

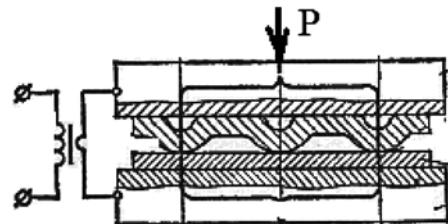


Рис. 4. Схема рельефной сварки

сварки, приведенные в [10]. При точечной сварке детали собирают внахлестку, зажимают между электродами, связанными со сварочным трансформатором, при включении которого детали нагреваются кратковременным (0,01–0,5 с) импульсом тока до появления расплавленной зоны в месте контакта деталей. Разновидностью точечной сварки является рельефная сварка (рис. 4).

Кроме времени контакта, основными характеристиками точечной сварки являются плотность тока (150 А/мм²) и давление (до 160 МПа) [10].

Анализ условий выполнения контактной точечной электросварки показал, что при взаимодействии пары колесо рельс в условиях дискретного контакта вполне возможно сваривание отдельных микровыступов шероховатости контактирующих поверхностей. В частности, согласно [15] контактные напряжения на дорожке катания колеса по рельсу могут достигать до 600 МПа и выше. При этом температура вспышки (рис. 2) взаимодействия выступов шероховатостей поверхностей колеса и рельса может достигать значений, соизмеримых с температурой плавления материала контактирующих тел.

В дополнение к изложенному следует отметить, что при повышении температуры стали модуль упругости и предел прочности понижаются (рис. 5) [11, 14], следовательно, создаются благоприятные условия для пластической деформации и осуществления процес-

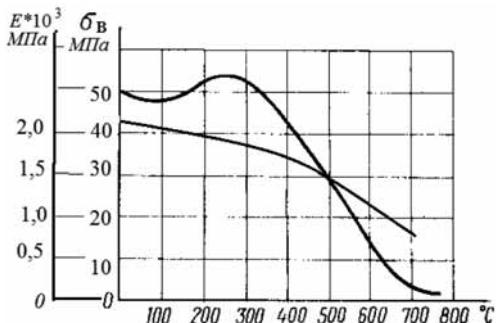


Рис. 5. Влияние температуры на величину предела прочности и модуля упругости стали

са схватывания (сварки) выступов шероховатости контактирующих поверхностей. В частности, как было отмечено выше, процесс передачи крутящего момента от колеса к рельсу сопровождается проскальзыванием, вследствие чего в зоне контакта кроме теплового действия электрического тока, протекающего по контакту колесо – рельс, возникают значительные температурные градиенты, способствующие появлению благоприятных условий для сварки. Кроме того, при нагружении током контактирующих колеса и рельса, резко усиливаются окислительные процессы. Прохождение тока через контакт вызывает тепловыделение и ускорение окислительных процессов. Тепловыделение приводит к снижению прочности поверхностных слоев, деструкции связующего в композиционных материалах тормозных колодок локомотивов, термическим напряжениям, диссоциации адсорбированных пленок на металле [16].

При искро- и дугообразовании помимо перечисленных процессов имеет место электроэррозия, в результате чего происходит разрушение контактирующих поверхностей и взаимный перенос материала с одной поверхности на другую.

В условиях тепловозной тяги, достаточно широко применяемой при

открытом способе разработки месторождений, также возможно возникновение условий для «микросваривания» выступов взаимодействующих шероховатых поверхностей колеса и рельса, но при этом схема процесса протекает несколько иначе: в этом случае точечная сварка осуществляется как сварка трением, при которой используется давление, кратковременный нагрев и взаимное перемещение свариваемых поверхностей, при этом механическая энергия непосредственно переходит в тепловую в месте стыка [10].

В условиях сварки трением протекают следующие процессы. При наличии сжимающего давления в условиях высокой температуры, обусловленной относительным скольжением труящихся тел, происходит притирка контактных поверхностей и разрушение жировых пленок, присутствующих на них в исходном состоянии. Границное трение уступает место комбинированному или сухому. В контакт вступают отдельные микровыступы, происходит их деформация и образование ювелирных участков с ненасыщенными связями поверхностных атомов, между которыми мгновенно формируются металлические связи и вследствие относительного движения поверхностей немедленно разрушаются. Этот процесс происходит непрерывно и сопровождается увеличением фактической площади контакта и быстрым повышением температуры в стыке. При этом необходимая температура для образования сварного соединения для черных металлов равна 1000–1300 °С [2, 10].

О вероятности достижения температур подобного уровня свидетельствуют образцы рельсов, бывших в эксплуатации (рис. 6) на Тюльганском угольном карьере (Оренбургская область), на которых явно видны следы пластических деформаций (показано стрелками).

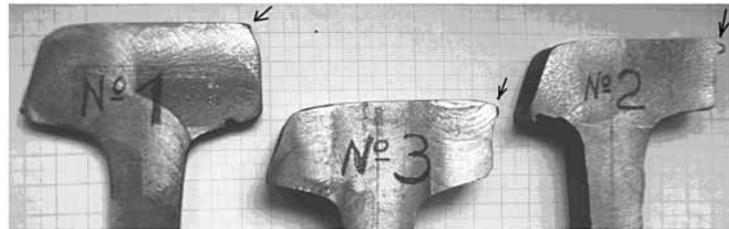


Рис. 6. Образцы изношенных рельсов

Таким образом, одну из причин увеличения шероховатости взаимодействующих поверхностей колес локомотивов с электрической и тепловой тягой с рельсами можно объяснить следующим образом.

Пластическая деформация выступов шероховатых поверхностей и внедрение одной металлической поверхности в другую создают условия для удаления оксидных и адсорбированных пленок масел, жиров и влаги и образования в зоне контакта новых поверхностей, обладающих большей энергией. При действии высоких температур, обусловленных физико-химическими процессами при прохождении тока через контакт колеса и рельса, с одной стороны, и проскальзыванием бандажей локомотива относительно рельса, с другой стороны, в зоне контакта колеса с рельсом могут образоваться мостикиевые узлы спайки между выступами шероховатых поверхностей. При движении локомотива данные узлы разрушаются, вследствие чего происходит вырывание частиц металла из тела колеса или рельса и осуществляется перенос частиц металла с одной поверхности на другую.

Основываясь на приведенный выше анализ, можно объяснить одну из причин увеличения шероховатости поверхностей катания системы колесо – рельс после приработки в процессе эксплуатации.

При взаимодействии колеса локомотива с рельсом в зоне их контакта могут происходить процессы «мик-

росварки» выступов шероховатых поверхностей, вследствие чего поверхности катания становятся менее гладкими, что ухудшает условия взаимодействия колес с рельсами.

Учитывая вышеприведенные исследования и принимая во внимание опыт из международной практики железнодорожного движения [17], для снижения вероятности возникновения условий протекания процессов микросварки в зоне контакта системы колесо – рельс, целесообразно использовать специальные профили колеса и рельса, которые называют конформными. Согласно принятой международной терминологии – понятие конформности обозначает общее состояние контактирующих поверхностей профилей колеса и рельса, которые в зоне контакта имеют подобные очертания.

В результате исследований [18] установлено, что в условиях сравнительно высоких скоростей скольжения применение конформных профилей позволит за счет увеличения поверхности контакта улучшить процесс теплообмена и тем самым снизить температуру и контактные напряжения в зоне контакта колеса карьерного локомотива с рельсом.

Выводы

1. Для улучшения условий взаимодействия системы колесо – рельс необходимо ограничить скорость проскальзывания колеса локомотива относительно рельса для исключения возможности возникновения темпера-

турных условий, способствующих образованию мостиков сварки (схватывания) между микровыступами контактирующих поверхностей.

2. Для уменьшения количества тепла, выделяемого в зоне контакта колеса локомотива с рельсом, целесообразно обеспечивать своевременное профилирование взаимодействующих поверхностей путем мониторинга.

3. В соответствии с вышеизложенным следует предположить, что электровозная тяга за счет образования

между колесом и рельсом мостиков сварки будет иметь более высокую тяговую способность по сравнению с тепловозной, однако, при этом интенсивность износа контактирующих поверхностей будет пропорциональна изменению тяговой способности.

4. Для определения степени влияния вида тяги на характеристики работы карьерных локомотивов целесообразно провести экспериментальные исследования в реальных условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Лужнов Ю.М. Нанотрибология скрепления колес с рельсами. Реальность и возможности. – М.: Интект, 2009. – 176 с.
3. Демкин Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
4. Косиков С.И. Фрикционные свойства железнодорожных рельсов. – М.: Наука, 1967. – 112 с.
5. Лужнов Ю.М. Физические основы и закономерности скрепления колес локомотивов с рельсами. Дисс. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. – М.: МИИТ, 1978.
6. Ресурс и ремонтопригодность колесных пар подвижного состава железных дорог. Монография / Под ред. И.А. Иванова. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 264 с.
7. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.П., Гаврилюк В.С. Триботехника: учеб. пособие. – М.: КНОРУС, 2011. – 408 с.
8. Озава И., Такасиге Т. Исследование электрического сопротивления контакта колеса с рельсом // Железные дороги мира. – 1992, – № 7.
9. Лужнов Ю.М., Попов В.А., Керопян А.М., Попова М.В. О возможностях влияния тяговых токов электровозов на работу фрикционной пары колесо – рельс / Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Научные труды II Международной научной конференции, в 2-х томах, т. 2. – М., 2012. – С. 77–82.
10. Стеклов О.И. Основы сварочного производства. – М.: Высшая школа, 1981. – С. 105–120.
11. Рыбаков В.М. Дуговая и газовая сварка. – М.: Высшая школа, 1986. – С. 64–66.
12. Демкин Н.Б., Измайлов В.В. Развитие учения о контактном взаимодействии деталей машин // Вестник машиностроения. – 2008, – № 10. – С. 28–32.
13. Крагельский И.В., Демкин Н.Б. Влияние шероховатости и свойств материалов на фактическую площадь касания и сближения / Качество поверхности деталей машин, № 5. – М.: Изд-во АН СССР, 1961.
14. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 734 с.
15. Контактно-усталостные повреждения колес грузовых вагонов / Под ред. С.М. Захарова. – М.: Интект, 2004. – 160 с.
16. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Учебник для технических вузов / Под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.
17. Харрис У.Дж., Захаров С.М., Ландгрен Дж. и др. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса. Пер. с англ. – Интертекст, 2002. – 408 с.
18. Керопян А.М. Теоретические исследования условий обеспечения конформного контакта системы «колесо – рельс» карьерного железнодорожного транспорта // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 2. – С. 11–16. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Керопян Амбарцум Мкртичевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: am_kerop@mail.ru, Бибиков Павел Яковлевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: pbibikow@yandex.ru, МГИ НИТУ «МИСиС».

INTERACTION MINING LOCOMOTIVES TRACTION WHEELS WITH RAILS, DEPENDING ON THE OPERATING CONDITIONS

Keropyan A.M.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: am_kerop@mail.ru,

Bibikov P.Ya.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: pbibikow@yandex.ru,

¹ Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

The comparative analysis of the terms of engagement with the rail wheels of the locomotive in electric and diesel-powered career rail. A description of the conditions conducive to the formation of bridges welding (setting) between micropromotions contacting surfaces. The conclusions about the impact of modes of interaction of the wheels of locomotives with the rails on their traction capability.

Key words: wheel of the locomotive, rail, electric traction, diesel traction, bridges welding, surface roughness, temperature gradient, gripe.

REFERENCES

1. Kragel'skiy I.V. *Trenie i iznos* (Friction and wear), Moscow, Mashinostroenie, 1968, 480 p.
2. Luzhnov Yu.M. *Nanotribologiya stsepleniya koles s rel'sami. Real'nost' i vozmozhnosti* (Nanotribology of wheel-rail adhesion. Reality and capabilities), Moscow, Intekst, 2009, 176 p.
3. Demkin N.B. *Kontaktirovaniye sherokhovatyykh poverkhnostey* (Contact of rough surfaces), Moscow, Nauka, 1970, 227 p.
4. Kosikov S.I. *Friktionnye svoystva zheleznodorozhnykh rel'sov* (Friction characteristics of railway rails), Moscow, Nauka, 1967, 112 p.
5. Luzhnov Yu.M. *Fizicheskie osnovy i zakonomernosti stsepleniya koles lokomotivov s rel'sami* (Physical background and laws of locomotive wheel-rail adhesion), Doctor's thesis, Moscow, MIIT, 1978.
6. *Resurs i remontoprigodnost' kolesnykh par podvizhnogo sostava zheleznykh dorog*. Monografiya. Pod red. I.A. Ivanova (Life time and maintainability of wheelsets of rolling stock. Monograph. Ivanov I.A. (Ed.)), Moscow, INFRA-M, 2011, 264 p.
7. Garkunov D.N., Mel'nikov E.L., Gavrilyuk V.S. *Tribotekhnika: uchebnoe posobie* (Triboengineering: Educational aid), Moscow, KNORUS, 2011, 408 p.
8. Ozava I., Takasige T. *Zheleznye dorogi mira*. 1992, no 7.
9. Luzhnov Yu.M., Popov V.A., Keropyan A.M., Popova M.V. *Fundamental'nye issledovaniya i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii. Nauchnye trudy II Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*, t. 2 (Basic research and innovative technologies in machine engineering. II International Conference Proceedings, vol. 2), Moscow, 2012, pp. 77–82.
10. Steklov O.I. *Osnovy svarochnogo proizvodstva* (Fundamental principles of welding engineering), Moscow, Vysshaya shkola, 1981, pp. 105–120.
11. Rybakov V.M. *Dugovaya i gazovaya svarka* (Arc and flame welding), Moscow, Vysshaya shkola, 1986, pp. 64–66.
12. Demkin N.B., Izmaylov V.V. *Vestnik mashinostroeniya*. 2008, no 10, pp. 28–32.
13. Kragel'skiy I.V., Demkin N.B. *Kachestvo poverkhnosti detaley mashin*, no 5 (Surface quality of machine parts, no 5), Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1961.
14. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* (Reference book on strength of materials), Kiev, Naukova dumka, 1988, 734 p.
15. *Kontaktno-ustalostnye povrezhdeniya koles gruzovyykh vagonov*. Pod red. S.M. Zakharova (Contact-fatigue damage of freight car wheels. Zakharov S.M. (Ed.)), Moscow, Intekst, 2004, 160 p.
16. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)*. Uchebnik dlya tekhnicheskikh vuзов. Pod red. A.V. Chichinadze (Basics of tribology (friction, wear, lubrication). Textbooks for technical institutions. Chichinadze A.V. (Ed.)), Moscow, Tsentr «Nauka i tekhnika», 1995, 778 p.
17. Kharris U.Dzh., Zakharov S.M., Landgren Dzh. *Obobshchenie peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeystviya kolesa i rel'sa* (Generalization of advanced experience on heavy-weight movement: Issues of wheel and-rail interaction, English-Russian translation), Intertekst, 2002, 408 p.
18. Keropyan A.M. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh*. 2013, no 2, pp. 11–16.