
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 531.43

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЛЬСОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

© 2024 г. А. М. Керопян¹, А. Ю. Албагачиев², *

¹Московский научно-исследовательский проектно-изыскательский институт технологий
и инноваций, Москва, Россия

²Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: albagachiev@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.01.2023 г.

После доработки 10.02.2024 г.

Принята к публикации 19.02.2024 г.

В результате теоретических исследований установлено, что на коэффициент трения взаимодействующих поверхностей рельсовых транспортных средств существенное влияние оказывают шероховатость контактирующих поверхностей; фактическая площадь контакта; температура в зоне контакта системы “колесо–рельс”; скорость взаимного скольжения (пробуксовки) контактирующих поверхностей. Установлено, что для обеспечения критерия прочности и уменьшения износа следует ограничить температуру в зоне контакта системы “колесо–рельс” в пределах 300°С с помощью контроля скорости скольжения колеса относительно рельса. Выявлено, что эффективное функционирование системы “колесо–рельс” можно реализовать при взаимодействии обработанных рабочих поверхностей колеса и рельса с шероховатостью R_z 20–40 мкм. Реализация предлагаемых технических решений с применением трибологических методов исследований позволит обеспечить возможность повышения коэффициента трения системы “колесо–рельс” до 27%.

Ключевые слова: шероховатость поверхностей, фактическая площадь контакта, температура в зоне контакта, скорость скольжения (пробуксовки), трибологические методы исследований

DOI: 10.31857/S0235711924030022, **EDN:** PHOZGG

В настоящее время не существует единой общепринятой теории трения взаимодействующих поверхностей [1, 2]. Это связано в первую очередь со сложностью самого явления и неоднозначностью его механизмов при различных условиях протекания фрикционного процесса.

Первые исследования явления трения были проведены Леонардо да Винчи, результаты которых, впоследствии, были подтверждены Амонтоном. В этих исследованиях преобладали чисто механические представления о процессе внешнего трения. В основу изучения трения было положено рассмотрение взаимодействия поверхностей твердых (абсолютно жестких) тел [1, 2].

Основываясь на имеющиеся результаты исследований, современная классическая механика утверждает, что сила трения двух взаимодействующих тел в достаточно широких пределах не зависит от площади соприкасающихся тел [3]. Это

утверждение является следствием того, что в классической механике, основанной на законах Кулона—Амонтона (а точнее, Леонардо да Винчи—Амонтона) принято считать взаимодействующие тела абсолютно гладкими, т.е. лишенными каких-либо шероховатостей.

Современная теория контактного взаимодействия соприкасающихся тел, являющаяся предметом изучения науки, именуемой **Трибология**, получившая развитие в работах И. В. Крагельского, Н. Б. Демкина, А. В. Чичинадзе, Ю. М. Лужнова и их учеников, считает контакт взаимодействующих тел дискретным, т.е. точечным, и состоящим из множества точечных контактов, обусловленных взаимодействием выступов микрошероховатостей площадок контакта взаимодействующих тел [2, 4–6].

В машиностроении при проектировании узлов трения для уменьшения износа и увеличения долговечности, например — подшипников скольжения, основным критерием является минимизация коэффициента трения. Это диктуется необходимостью уменьшения контактных напряжений в зоне трения взаимодействующих поверхностей, что подтверждено многими теоретическими и практическими исследованиями. Также, многочисленными исследованиями установлено, что по окончании приработки (при неизменных условиях работы) на взаимодействующих поверхностях устанавливается одинаковая, **равновесная**, шероховатость, не зависящая от величины и характера первоначальной, а зависящая от условий изнашивания [7].

Для пар трения, каковыми являются системы “колесо—рельс” рельсового транспорта, основным критерием эффективного функционирования является, пропорциональный коэффициенту трения, коэффициент сцепления. Следовательно, для обеспечения нормальных условий работы необходимо установить для взаимодействующих поверхностей такую шероховатость, при которой будет обеспечиваться основная функция системы “колесо—рельс”, т.е. передача вращающего момента от колеса к рельсу и обеспечение соответствующего тягового усилия локомотива.

Многочисленными исследованиями установлено, что контакт реальных шероховатых поверхностей носит дискретный характер, обусловленный взаимодействием отдельных выступов микронеровностей. Силу трения на каждом выступе контактирующих профилей согласно [4, 8] можно представить в виде двух слагаемых

$$F = F_{\text{мол}} + F_{\text{мех}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{мол}}$ — молекулярная составляющая силы трения; $F_{\text{мех}}$ — механическая составляющая силы трения.

Эта формула выражает один из основных трибологических законов. Согласно молекулярно-механической теории И. В. Крагельского при взаимодействии поверхностей с низкой шероховатостью (“чистых” поверхностей) доминирующим фактором является молекулярная составляющая силы трения, для грубо обработанных поверхностей преобладающим является механическая составляющая силы трения.

В работе [9] установлено, что рациональной шероховатостью пар трения типа “колесо—рельс” является шероховатость R_z 20–40 мкм. При случайном расположении шероховатостей на поверхностях контактирующих тел контактное сближение этих тел под действием внешней нагрузки определяет фактическую площадь соприкосновения, определяемую геометрией контактирующих поверхностей.

Взаимный контакт деталей первоначально происходит по выступам поверхностей на высотах, образованных микронеровностями (рис. 1).

Таким образом, суммарная сила трения зависит от фактической площади касания контактирующих поверхностей, что является важным фактором повышения силы трения и, как следствие, увеличения коэффициента трения контактирующих поверхностей системы “колесо—рельс” [5, 10].

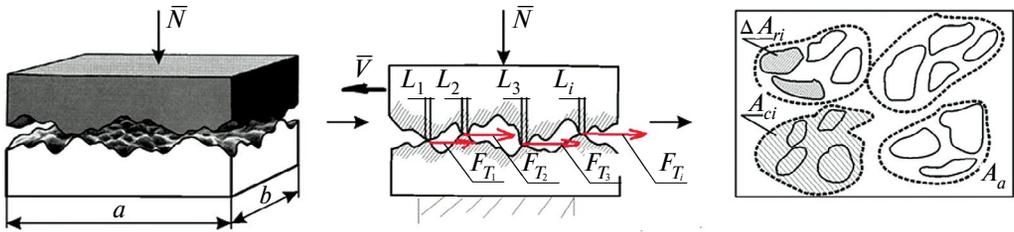


Рис. 1. Схема реального контакта твердых деталей и схема образования реального значения силы трения в пятне контакта.

При трении двух тел (например, при качении колеса по рельсу) неровности одного тела неоднократно деформируют поверхностный слой другого тела. При этом одни и те же точки на поверхностях трения испытывают микродеформации типа растяжение—сжатие с различными амплитудами и частотами. При этом качение практически всегда сопровождается скольжением, при этом скорость скольжения (пробуксовки) колес по рельсам оказывает существенное влияние на износ системы колесо—рельс. Достаточно сказать, что увеличение скорости скольжения колес с 0.8 до 2.0% вызывает увеличение износа рельсов в 2, 3 раза. В связи с этим в зоне контакта взаимодействующих тел повышается температура взаимодействующих поверхностей.

Как следует из молекулярно-механической теории внешнего трения и усталости теории изнашивания твердых тел, фрикционно-износные характеристики и механические свойства материалов пар трения находятся в различных нелинейных функциональных зависимостях. При этом эти зависимости могут существенно меняться от режима трения и, в первую очередь, от теплового и температурного режимов [4, 11, 12]. Это иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 2 [2].

Зависимости коэффициента трения f и интенсивности износа I_n от температуры поверхности трения нелинейны (рис. 2).

Сравнительный анализ графиков на рис. 2 показывает, что при повышении температуры в зоне контакта коэффициент трения падает и достигает минимального значения при температуре около 500°С. При дальнейшем повышении температуры

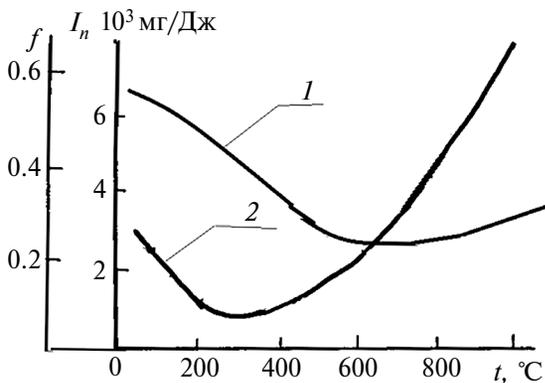


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения 1 и интенсивности износа 2 от температуры поверхности трения при трении колесной стали в паре с легированным чугуном ЧНМХ при вертикальной нагрузке 1.5 МПа [2].

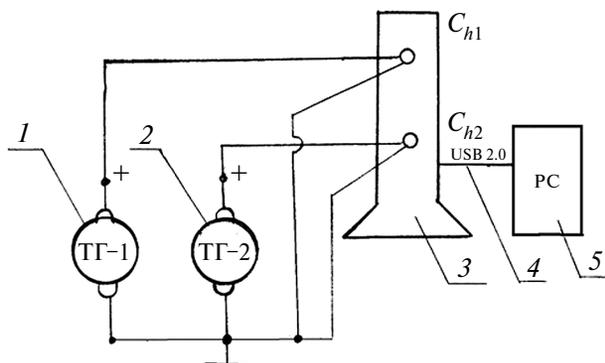


Рис. 3. Блок-схема измерений проскальзывания колес локомотивов: 1 – тахогенератор эталонной оси; 2 – тахогенератор измеряемой оси; 3 – компьютерный осциллограф-приставка; 4 – интерфейс USB; 5 – PC (ноутбук).

коэффициент трения начинает увеличиваться, однако при этом ухудшаются физико-механические (прочностные) свойства взаимодействующих поверхностей. Примерно по такой зависимости изменяется интенсивность изнашивания $I_{и}$. Однако минимальное значение интенсивность износа достигает при температуре около 300°C .

Анализ зависимостей по графикам 1, 2 (рис. 2) показывает, что исходя из условий обеспечения критерия предела прочности и улучшения тяговой способности локомотивов, следует ограничить температуру в зоне контакта рабочих поверхностей колеса и рельса в пределах 300°C . Таким образом, следующим, не менее важным фактором повышения коэффициента трения взаимодействующих поверхностей тяговых транспортных средств является **температура в зоне контакта взаимодействующих тел**.

Проведенные теоретические исследования, подтвержденные экспериментально, позволили найти запатентованный способ обнаружения и устранения скольжения колес относительно рельсов в течение неограниченного времени (рис. 3) [9].

Устройство, блок-схема которого представлена на рис. 3, состоит из двух тахогенераторов ТГ-30П 1 и 2, смонтированных на осях колесных пар локомотива, причем один из тахогенераторов был подключен к оси одной из неприводных колесных пар локомотивосостава и был принят в качестве эталонного [13]. Напряжения тахогенераторов поступали на вход приставки-осциллографа (рис. 3) и с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в виде двоичных данных хранились в памяти компьютера. Поэтому здесь также имелась информация о величине проскальзывания каждой из приводных колесных пар локомотива в виде разности соответствующих данных для любого момента времени. Такой метод измерения разности напряжений называется компенсационным [14]. Далее, после получения информации о буксующей колесной паре машинист включает систему подачи песка и под буксующую пару подается необходимое количество сухого кварцевого песка.

Можно сделать вывод, что подсыпка песка под каждую колесную пару позволит существенно повысить коэффициент сцепления (до 50%), однако подачу песка необходимо проводить избирательно, т.е. именно под ту пару, уровень буксования которой выше допустимого предела, контролируемого запатентованным нами устройством.

Здесь можно сделать вывод, что регулирование проскальзывания (пробуксовки) тяговых колес рельсовых транспортных средств создает реальные предпосылки для снижения одного из факторов, способствующих снижению температуры в зоне контакта взаимодействующих поверхностей системы “колесо–рельс”.

Заключение. Анализ результатов расчета максимальных значений коэффициентов трения показал, что при профилировке рельсов с обеспечением шероховатости R_z 20 мкм расчетный коэффициент трения можно повысить до 12% и, следовательно, коэффициент сцепления пары “колесо–рельс” также может быть повышен.

В исследованиях [6] отмечено, что при взаимодействии приработанных **поверхностей профилей колеса и рельса, что характеризуется увеличенной шириной дорожек катания на рельсах**, коэффициент трения увеличивается до 9.0%.

Анализ проведенных исследований в области влияния скорости скольжения (пробуксовки) на температуру в зоне контакта взаимодействующих поверхностей системы “колесо–рельс” позволяет обеспечить снижение температуры до 300°C и уменьшить износ рабочих поверхностей колесно-рельсовой системы.

Реализация предлагаемых технических решений с применением трибологических методов исследований позволит обеспечить возможность повышения коэффициента трения системы “колесо–рельс” до 27%.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гуковский М. А.* Механика. Леонардо да Винчи. Изд. АН СССР, 1947. 815 с.
2. *Чичинадзе А. В., Браун Э. Д., Буше Н. А. и др.* / Под ред. А. В. Чичинадзе. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. М.: Машиностроение, 2001. 778 с.
3. *Тарз С. М.* Краткий курс теоретической механики: Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 2010. 416 с.
4. *Крагельский И. В.* Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
5. *Демкин Н. Б.* Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с.
6. *Лужнов Ю. М.* Нанотрибология сцепления колес с рельсами. Реальность и возможности. М.: Интекст, 2009. 176 с.
7. *Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.* Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
8. *Крагельский И. В., Михин Н. М.* Узлы трения машин. Справочник. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
9. *Керопян А. М.* Развитие теории взаимодействия и обоснование рациональных параметров системы колесо-рельс карьерных локомотивов в режиме тяги: Дисс. ... докт. тех. наук. Екатеринбург: Ур. гос. гор. ун-т, 2015.
10. *Михин Н. М., Ляпин К. С., Добычин М. Н.* Исследование тангенциальной прочности адгезионной связи // В сб. “Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. М.: Наука, 1971.
11. Справочник по триботехнике / Под ред. М. Хебды и А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение. Т. 1, 1989. 400 с.
12. *Чичинадзе А. В.* Расчет и исследование внешнего трения при торможении. М.: Наука, 1967. 231 с.
13. Паспорт шахтного локомотива “Шёма – 350”. Schoma, Cristoph Schottler Mschienenfabrik GmbH, Gergmani. Заводской номер 6040. 18. 10. 2011.
14. *Карандеев К. Б.* Специальные методы электрических измерений. Компенсационный метод измерений. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 344 с.