

УДК 625.032

*Д-р техн. наук Е. Н. Лысков,
канд. техн. наук С. В. Воронин*

ТЕПЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТРИБОСИСТЕМЕ «КОЛЕСО-РЕЛЬС»

Введение. При изучении энергетики процесса взаимодействия подвижного состава с верхним строением пути главная роль отводится контакту «колесо-рельс». Здесь основными энергетическими составляющими являются силы сцепления ведущих колес с рельсами по поверхности катания и силы трения колес по рельсам, составляющие большую часть общего сопротивления передвижения. Поэтому процесс качения колеса по рельсу следует изучать с использованием результатов современных исследований в области трибологии и физики контактных взаимодействий твердых тел.

Анализ исследований. На сегодняшний день вариант качения колеса

по рельсу описывается учеными, главным образом, на основе представлений механики контактного взаимодействия с учетом упругопластических деформаций неровностей поверхностей [1-3]. Однако, согласно экспериментальным данным, напряжения в поверхностных слоях контакта «колесо-рельс» часто превышают предел текучести материала, а значит, роль шероховатости поверхности незначительна. Основы молекулярно-механической теории трения, разработанной И. В. Крагельским, Б. В. Дерягиным, А. С. Ахматовым и другими учеными в середине прошлого века для граничного трения [4-6] практически не используются при описании взаимодействия колеса с рельсом,

поскольку при сухом трении физики сталкиваются с проблемой аналитического описания адгезионных и других типов связей. Здесь ведущую роль начинает играть взаимодействие поверхностей на атомарном уровне («ювенильные» поверхности), следовательно, на первом плане оказываются электромагнитные взаимодействия конденсированных фаз. Работы в этом направлении появились в конце прошлого века и сегодня активно развиваются, особенно в области фонованого трения, которое обусловлено электромагнитными колебаниями взаимодействующих атомов [7]. Такие работы, безусловно, раскрывают часть глубинных процессов, протекающих на поверхности контакта, однако не учитывают всего спектра явлений, имеющих место при качении колеса по рельсу. Незученными остаются вопросы влияния окислов, продуктов износа, внешних примесей, фактической площади контакта с учетом атомарной шероховатости, термоэлектрических, термомагнитных и других электроконтактных явлений. Перечисленные факторы в совокупности

определяют силы трения и сцепления, а их изменение в процессе качения колеса по рельсу приведет к изменению тягово-сцепных характеристик локомотивов и суммарного сопротивления передвижению подвижного состава.

Целью работы является анализ тепловых и электрических контактных явлений на поверхности катания, вызванных сближением поверхностей на фактической площади контакта до межатомных расстояний, при наличии примесей и окислов.

Основные процессы и явления в контакте «колесо-рельс». Рассмотрим движение колеса по рельсу (рис. 1). Считаем, что прочность материала колеса равна прочности материала рельса, т. е. деформируется как колесо, так и рельс. Допускаем также, что номинальная поверхность контакта ограничивается в продольном направлении дугой AD, длина которой зависит от величины внешней нагрузки N , скорости движения V , прочности материалов и геометрии контактирующих тел. Колесо движется по рельсу без проскальзывания.

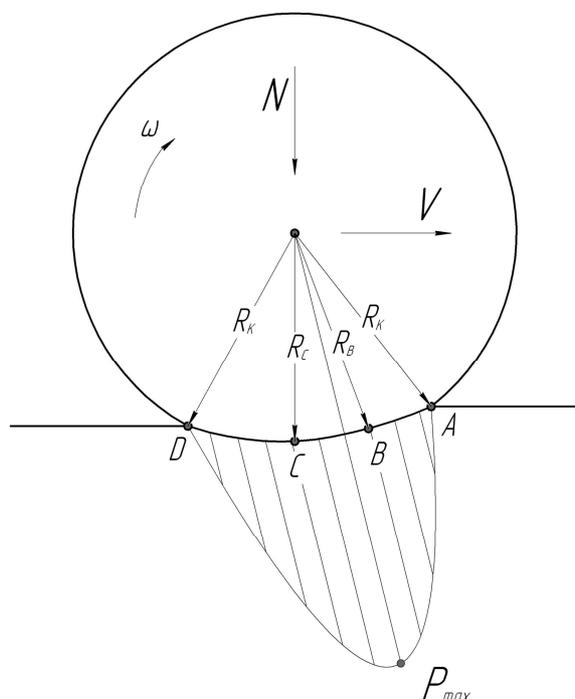


Рис. 1. Продольное изменение давления по номинальной поверхности контакта

Деформация контактирующих поверхностей приводит к изменению линейной скорости движения точек поверхности колеса, принадлежащих участку AD. Так, скорость точки A, соответствующая началу контакта, равна произведению $\omega \cdot R_K$, но скорости точек внутри участка AD будут меньше, поскольку уменьшается их удаление от оси вращения колеса, т.е. $R_B < R_K$ и $R_C < R_K$. Согласно теории взаимодействия колеса с опорной поверхностью [8], предполагаем, что контакт колеса с рельсом без проскальзывания имеет место только на участке BC, так как скорости точек внутри этого участка близки к скорости движения оси колеса V . На участках же AB и CD имеет место микропроскальзывание, сопровождающееся трением и износом поверхностей. Скорость проскальзывания в

этом случае тем выше, чем ближе точки контакта к точкам A или D.

Рассмотрим процессы и явления, протекающие в контакте колеса и рельса на каждом из выделенных участков. На участке AB (рис. 2) происходит резкое сближение поверхностей от микро- до наноуровня, что приводит к дроблению частиц механических примесей и продуктов износа, пластической деформации неровностей поверхностей, внедрению измельченных частиц в объем металла колеса и рельса. Высокая интенсивность изнашивания поверхностей приводит к росту количества продуктов износа. Процесс дробления механических примесей и пластическая деформация неровностей сопровождаются интенсивным тепловыделением и окислением поверхностей.

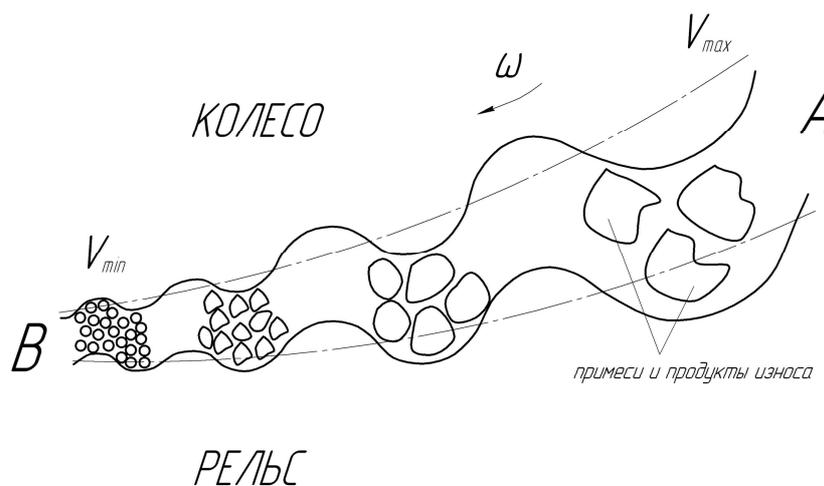


Рис. 2. Взаимодействие колеса с рельсом на участке AB

В конце участка AB поверхности сближаются до атомарной шероховатости. Измельченные до аналогичных размеров продукты износа, представляющие собой окислы $\gamma - Fe_2O_3$, $\lambda - Fe_2O_3$ и др., а также частицы неметаллической природы (кварц и проч.) внедряются в поверхности контакта, разрушая окисные пленки и деформируя кристаллические решетки в приповерхностной области.

На участке BC происходит «квазистационарный» контакт колеса с рельсом (рис. 3). Поверхности контакта на этом участке имеют максимально сглаженную форму и представляют собой случайный набор различных по природе субмикроскопических участков: «ювенильный» металл 1, окислы металла 2 и внедренные частицы неметаллического происхождения 3. С точки зрения

классической физики первый тип является проводником электрического тока, второй – полупроводником, а третий – диэлектриком [9]. Каждому из них на рис. 3 присвоено соответствующее обозначение – m, s и d.

Критическое сближение поверхностей приводит к взаимодействию электромагнитных полей атомов отдельных субмикроучастков. Такое взаимодействие, благодаря движению колеса по рельсу, сопровождается интенсивным выделением тепла, и в местах контакта температура (локальная) достигает значений 800 °С. Эта температура превышает в 1,5–2 раза температуру поверхности отожженных

сталей [10], она играет различную роль в разнообразных контактных явлениях применительно к колесу и рельсу. Можно полагать, что при равномерном распределении субмикроучастков по поверхности колеса и рельса между собой взаимодействуют 6 типов пар: m – m; m – s; m – d; s – s; s – d; d – d. Каждое такое парное взаимодействие можно представить в виде спая локальной термодпары, а результирующая от действия таких термодпар (векторное сложение токов) приводит к созданию контактного термоэлектрического тока на рассматриваемом участке поверхности.

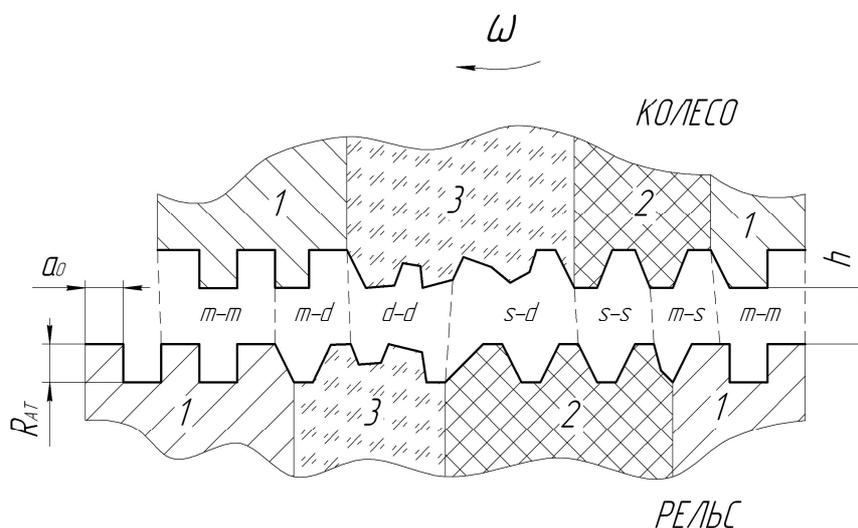


Рис. 3. Взаимодействие колеса с рельсом на участке ВС:

R_{AT} , a_0 – параметры атомарной шероховатости; h – сближение поверхностей; 1 – «ювенильный» металл; 2 – окисел; 3 – примесь неметаллического происхождения

Кроме этого, в местах контакта m – m происходит «схватывание» ювенильных поверхностей, как следствие коэффициент сцепления колеса с рельсом будет иметь максимальное значение, т.е. локальное повышение температуры на ювенильных участках поверхностей трибосистемы, в конечном итоге, приводит к свариванию этих участков с образованием «мостиков» сварки. Описанный механизм сопровождается непрерывным разрушением окисных плёнок и увеличением количества узлов «схватывания».

На участке CD (рис. 4) протекают явления и процессы, относящиеся к завершающей стадии контакта колеса с рельсом. Этот участок характеризуется в целом ростом зазора между контактирующими поверхностями от атомарных до микроскопических размеров, износом поверхностей с образованием частиц окислов, а также ростом их шероховатости. Такие процессы связаны, главным образом, с возрастающей ролью проскальзывания поверхности колеса по рельсу по мере движения к точке D.

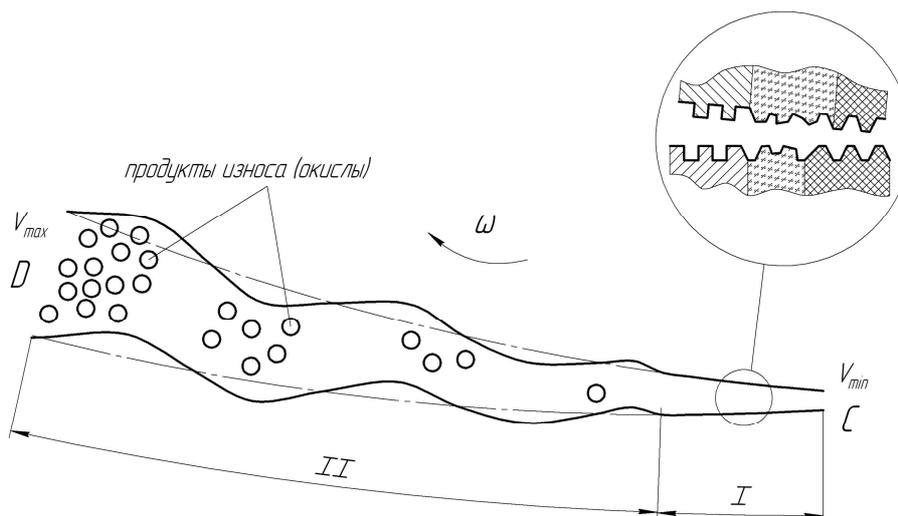


Рис. 4. Взаимодействие колеса с рельсом на участке CD

Первый этап на участке CD характеризуется интенсивным разрушением узлов «схватывания» поверхностей, образованных ранее. Он сопровождается большими затратами энергии и влияет на величину сопротивления передвижению колеса. На втором этапе «схватывание» поверхностей отсутствует, а ведущим процессом является изнашивание с образованием однородных частиц износа – окислов металлов. Кроме того, из зоны контакта могут выноситься внедренные ранее в поверхность диэлектрические частицы.

Описанные выше закономерности взаимодействия контактирующих поверхностей колеса и рельса позволяют предположить наличие в контакте следующих физико-химических явлений:

1) на сопряженных поверхностях трения колесо-рельс (в местах контакта) могут возникать высокие местные температуры. Они локализируются в точках фактического контакта, положение которых со временем изменяется, так как происходит изнашивание выступов, замена их новыми, сближение до атомарной шероховатости. Температура в точках контакта в локальном исполнении может достигать $700...800^{\circ}\text{C}$. Всплеск температуры приводит к «схватыванию»

субмикроскопических участков «ювенильных» металлических поверхностей с образованием узлов сварки. Температурное поле быстро затухает, по мере его распространения вглубь поверхностных слоёв и уже на глубине $0,1\text{ мм}$ может снижаться до $90...100^{\circ}\text{C}$;

2) контакт двух поверхностей по фактической площади сопровождается различными термоэлектрическими, термомагнитными явлениями, а также термо- и экзоэлектронной эмиссией. В начальный период работы колесо-рельс контакт их поверхностей происходит в основном по деформированным площадкам неровностей без слоя окислов, т.е. по «ювенильным» участкам. Поверхности разделены также частицами примесей и износа, подвергающихся дроблению под действием внешней нагрузки. С увеличением удельной нагрузки неровности поверхностей сглаживаются, поверхности сближаются до атомарной шероховатости, резко возрастает численность контактов субмикроскопических участков проводящей, полупроводящей и диэлектрической природы. Все это, а также неравномерность распределения температуры по фактической площади контакта, приводит к увеличению термоэлектрического тока. Субмикротоки

на отдельных участках, очевидно, суммируются, а результирующий ток можно обнаружить путём проведения экспериментальных исследований;

3) существенную роль на величину термоэлектрического тока оказывают окислы. Все они представляют собой полупроводники с различным типом проводимости. Согласно ранее проводимых исследований установлено [11], что коэффициент термо-э.д.с. у полупроводников значительно выше (10^{-2} - 10^{-3} в/град), чем у металлов (10^{-5} в/град), поэтому слой окислов играет роль усилителя термоэлектрических явлений. Тогда появляется возможность усилить или ослаблять усталостно-окислительные процессы за счет изменения скорости окисления поверхностей трения колесо-рельс, что приведёт к благоприятному варианту формирования узлов схватывания, изменению сил трения и сцепления. Например, такая возможность может появиться при наложении на зону контакта внешнего электрического поля.

4) при наложении внешнего электрического поля на зону контакта колеса и рельса возможны такие явления:

– внешнее электрическое поле может влиять на величину и полярность термоэлектрического тока. В связи с этим могут усиливаться или замедляться окислительные процессы, т.е. в процессе трения нарастающая окисная плёнка будет препятствовать непосредственному взаимодействию «ювенильных» поверхностей. Такое явление может сопровождаться увеличением контактного электрического сопротивления и уменьшением износа поверхностей трения;

– если внешнее поле влияет на термо-э.д.с, то следует ожидать интенсификации адсорбционных процессов или же обратного явления, т.е. могут ускоряться или замедляться адсорбционные процессы, особенно на начальном и заключительном этапе контакта. Кроме этого, внешнее поле может усиливать эффект генерации и

поглощения электронов как с поверхностей трения, так и из среды промежуточного слоя (окислов, диэлектрических примесей), что приведет к формированию электромагнитного поля, усиливающего эффект межатомарного притяжения между колесом и рельсом, как следствие, возрастет коэффициент сцепления в трибосистеме колесо-рельс;

– путем наложения внешнего электрического поля можно уменьшить электроэрозионные процессы, возникающие за счёт термоэлектрического тока. Такая гипотеза подтверждается экспериментальными исследованиями [12], в которых при компенсации термотока внешним электротоком удалось исключить эффект электроэрозии;

– при наложении сильного электрического поля [12] можно обнаружить эффект дробления поверхностного слоя в трибосистеме колесо-рельс. Электрические разряды по площади контакта колесо-рельс могут вызвать дробление окисной плёнки и абразивной среды. Такое явление сопровождается нарушением кристаллической структуры (повышение степени разрыхления) и соответственно уменьшением свободной поверхностной энергии, так как работа выхода электронов минимальна в местах испарений кристаллической решетки;

– воздействие электрического поля приводит к изменению величин электродного потенциала (увеличению) поверхностных единичных узлов схватывания. Такое явление способствует процессам разупорядочения структур в приповерхностных областях, как следствие, количество зон схватывания на фактической площади контакта возрастает. В свою очередь такой эффект приводит к росту сил сцепления в контакте колесо-рельс.

Выводы:

1. На фактической площади контакта колеса и рельса протекают различные

физико-механические, электрические и электро-химические процессы, развивающиеся как на микроскопическом уровне, так и на уровне атомарной шероховатости. Учитывая высокие контактные давления, наиболее значимые процессы протекают при сближении контактирующих поверхностей до уровня межатомарного взаимодействия.

2. Основными контактными процессами и явлениями, происходящими в процессе сближения контактирующих поверхностей, есть дробление частиц примесей, локальные всплески температур, рост и разрушение окисных пленок, наличие термо-э.д.с. на участках сближения разнородных поверхностей, диффузия атомов и образование узлов сварки на «ювенильных» участках контакта,

появление контактной разности потенциалов и обмена электронами на участках сближения до межатомарных расстояний. Такие явления определяют величину сцепления и сопротивления качению колеса по рельсу.

3) на перечисленные процессы и явления существенную роль может оказывать внешнее электрическое поле, которое способно как усиливать, так и ослаблять величину термо-э.д.с., электрическое сопротивление контакта, скорость окисления и адсорбции на поверхностях трения. Исследование влияния внешнего электрического поля на такие характеристики контакта позволят реализовать вариант управления сцеплением и трением при движении колес экипажей по рельсам.

Список литературы

1. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
2. Флайшер, Г. К связи между трением и износом. Контактные взаимодействия твердых тел и расчет сил трения и износа [Текст] / Г. Флайшер. – М.: Наука, 1971. – С. 163-169.
3. Демкин, Н.Б. Качество поверхностей и контакт деталей машин [Текст] / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
4. Крагельский, И.В. Трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
5. Дерягин, Б.В. Что такое трение? [Текст] / Б.В. Дерягин. – М.: АН СССР, 1963. – 232 с.
6. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения [Текст] / А.С. Ахматов – М.: Физматгиз, 1963. – 471 с.
7. Марков, Д.П. Механизмы сцепления пары колесо-рельс с учётом фононного трения [Текст] / Д.П. Марков // Вестник ВНИИЖТ. – М., 2003. – № 6.
8. Ткаченко, В.П. Кинематическое сопротивление движению рельсовых экипажей [Текст] / В.П. Ткаченко. – Луганск: ВГУ, 1996. – 200 с.
9. Матвеев, А.М. Электричество и магнетизм [Текст] / А.М. Матвеев. – М.: Высш. шк., 1983. – 464 с.
10. Чичинадзе, А.В. Исследование температурных полей некоторых узлов сухого трения [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / А.В. Чичинадзе. – М.: ИМАШ АН СССР, 1954. – 750 с.
11. Воробьёв, Д.В. О влиянии электрических и магнитных полей на трибологические характеристики пары колесо-рельс [Текст] / Д.В. Воробьёв // Вестник БГТУ. – 2004. – № 2. – С. 52-57.
12. Степанов, В.Н. Влияние природы контактирующих металлических материалов на циклическую прочность титанового сплава АТ-3 в условиях фреттинг-коррозии [Текст] / В.Н. Степанов, В.Ф. Терентьев // ФХММ. – 1968. – №1.

Ключевые слова: колесо, рельс, контакт, атомарная шероховатость, окислы, субмикроскопический участок, термопара, электрическое поле.

Аннотации

Розглянуто процес зближення контактуючих поверхонь при русі колеса по рейці; проведено аналіз теплових та електричних явищ, що відбуваються на різних стадіях контакту; встановлені ведучі процеси та явища, які визначають сили зчеплення й тертя між колесом та рейкою.

Рассмотрен процесс сближения контактирующих поверхностей при движении колеса по рельсу; проведен анализ тепловых и электрических явлений, протекающих на разных стадиях контакта; установлены ведущие процессы и явления, определяющие силы сцепления и трения между колесом и рельсом.

The process of convergence of the contacting surfaces when moving the wheel on the rail; analysis of thermal and electrical phenomena occurring at different stages of contact; the leading processes and phenomena that determine the adhesion and friction forces between wheel and rail.