УДК 621.8.053.8

А.М. Керопян, П.М. Вержанский, В.А. Мостаков, Р.К. Басов

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА СИСТЕМЫ КОЛЕСО – РЕЛЬС ОТ ШЕРОХОВАТОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Выполнены теоретические и практические исследования условий взаимодействия рабочих поверхностей бандажей карьерных локомотивов с рельсами и определены рациональные значения шероховатостей при профилировании рельсов с целью сокращения продолжительности процесса приработки пары колесо – рельс, что влияет на увеличение сроков эффективной эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: коэффициент трения, шероховатость поверхности рельсов и бандажей локомотивов, комплексный показатель шероховатости, параметры опорной кривой, радиус кривизны вершин неровностей, рациональная шероховатость.

Многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что коэффициент трения между взаимодействующими поверхностями согласно работ И.В. Крагельского, В.С. Комбалова, Н.М. Михина, Н.Б. Демкина [1, 2, 3] зависит от многих физико-механических свойств контактирующих поверхностей и, в том числе, от их шероховатости.

Для удобства оценки влияния шероховатости поверхностей в литературе вводится понятие комплексного показателя шероховатости Δ:

$$\Delta = \frac{h_{\max}}{Rb^{\frac{1}{\nu}}}, \qquad (1)$$

где R – расчетный радиус кривизны вершин неровностей, определяемый как среднее геометрическое радиусов кривизны вершин неровностей профилограмм рабочих поверхностей в

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 80–89.

продольном и поперечном направлениях, $R = \sqrt{r_{прод} \cdot r_{поп}}$; $h_{\max}$ – высота наибольшей неровности; b и ν – параметры опорной кривой шероховатой поверхности; $r_{прод}$ и $r_{поп}$ – радиусы вершин профилей, соответственно, в продольном и поперечном направлениях.

Согласно молекулярно-механической теории трения И.В. Крагельского [1], коэффициент трения твердых тел имеет две составляющие – молекулярную ($f_{мол}$), определяющуюся молекулярным взаимодействием в зоне контакта рабочих поверхностей системы колесо – рельс, и деформационную ($f_{деф}$), свойства которой действием молекулярных сил ввиду сложности структуры тел пока оценивать не представляется возможным [4]. А поэтому определяется с помощью специально поставленных опытов и известных уже представлений о природе вещества:

$$f = f_{мол} + f_{деф}\,. \tag{2}$$

Как было отмечено выше, шероховатость поверхности характеризуется комплексным показателем шероховатости Δ. При малых значениях комплексного показателя, т.е. при высоком классе чистоты поверхностей, доминирующим фактором является молекулярная составляющая силы трения. В зоне контакта преобладают упругие деформации [1], в связи с чем механическая составляющая сил трения мала по сравнению с молекулярной составляющей и составляет около 5% от суммарного коэффициента трения [3, с. 68]. При увеличении Δ в зоне контакта превалируют пластические деформации и, как следствие, молекулярная составляющая сил трения уменьшается, и основной коэффициент трения обеспечивается за счет механической, или как еще называют, деформационной составляющей сил трения. Кроме того, следует отметить, что близкие по классу чистоты, но разные по технологической обработке (различная величина Δ) поверхности, имеют различные значения коэффициента трения [3, с. 93].

В зависимости от показателя Δ, контурной нагрузки $p_с$ и физико-механических свойств контактирующих материалов (μ – коэффициента Пуассона, $\mu = 0{,}3$; E – модуля упругости, $E = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа) в литературе [1] приведены формулы для определения характера деформации в зоне контакта:

- для упругого ненасыщенного контакта

$$0 \le \frac{p_c\left(1-\mu^2\right)}{E} \le 6 \cdot 10^{-2}\Delta^{1/2}\,; \tag{3}$$

• для пластического насыщенного контакта

$$0,0625 \le p_c \ / \ HB \le 0,32\alpha HB, \tag{4}$$

где α – коэффициент гистерезисных потерь при одноосном растяжении (сжатии). Для закаленной стали $\alpha = 0,02$ [1, с. 30].

Контурная нагрузка определяется формулой

$$p_{\text{с}} = N/A_{\text{с}}, \tag{5}$$

где N – нагрузка, приходящаяся на одно колесо локомотива, Н; $A_{\text{с}}$ – контурная площадь контакта колеса с рельсом. По экспериментальным данным [5] для нагрузки 135 000 Н (при осевой нагрузке 270 000 Н, характерной для условий работы карьерных локомотивов) $A_{\text{с}}$ = 390 мм², тогда $p_{\text{с}}$ = 346,2 Н/мм².

Выполненные автором расчеты показали, что для класса чистоты поверхности R_z6.3(∇7) и выше деформации носят упругий ненасыщенный характер, а для грубо обработанных поверхностей чистотой R_z20(∇5) и ниже взаимодействие имеет признаки, свойственные пластическому насыщенному контакту. Поэтому коэффициенты трения для упругого ненасыщенного контакта и пластического насыщенного контакта, соответственно, определяются приведенными ниже формулами [11]:

$$f_1 = \frac{2,4\tau_0\left(1-\mu^2\right)^{0,8}}{{p_c}^{0,2}\Delta^{0,4}E^{0,8}} + \beta + 0,24\alpha_{эф}{p_c}^{0,2}\Delta^{0,4}\left(\frac{1-\mu^2}{E}\right)^{0,2}; \tag{6}$$

$$f_2 = \tau_0 \ / \ HB + \beta + 0,9\Delta^{1/2}\left(p_c \ / \ HB\right)^{1/2}, \tag{7}$$

где τ_0 – тангенциальная прочность на срез адгезионной связи[1]; β – пьезокоэффициент молекулярной составляющей трения [6, с. 205], характеризующий увеличение прочности на срез от нормального давления [7, с. 279]; $\alpha_{\text{эф}} \approx 2,5\alpha$ – коэффициент гистерезисных потерь при скольжении неровности, $\alpha = 0,02$ [1, с. 29–30]; HB – твердость материала.

Коэффициенты τ_0 и β определяются экспериментальными исследованиями. Для грубых стальных поверхностей – τ_0 = = 1256 МПа (пластический контакт), для чистых – τ_0 = 8400 МПа (упругий контакт), $\beta = 0,072$ [1 (с. 30 и 61), 8].

Теоретическими и экспериментальными исследованиями, выполненными в работах [9, 10], установлено, что при контак-

---

* Под тангенциальной прочностью адгезионной связи понимаются контактные касательные напряжения, обусловленные молекулярным взаимодействием в зонах фактического касания [1].

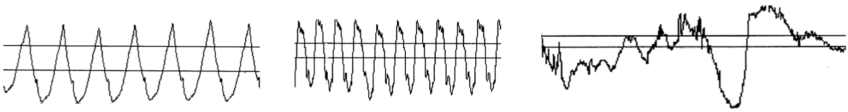

Рис. 1. Образцы характерных профилограмм рабочих поверхностей рельсов: а) Rz 76,5 (∇3), б) Rz 26,8 (∇5), в) Rz 3,99 (∇8)

тировании шероховатых поверхностей выступы более твердой поверхности внедряются в поверхность с меньшей твердостью. Учитывая, что твердость рельсовой стали несколько выше, чем твердость материала бандажа, дальнейшие исследования можно проводить на образцах рельсовой стали [9, 10].

С целью уточнения расчетных значений коэффициентов трения при взаимодействии колеса локомотива с рельсом при разных значениях степени их изношенности нами были подготовлены профилограммы образцов поверхностей катания головок рельсов Р65. Для исследования были приготовлены по 5 образцов с разной шероховатостью в диапазоне от R_z 1,322 до R_z 320 (всего – 25) изготовленных из образцов рельсов с различной шероховатостью и в том числе – изъятых из эксплуатации при замене верхнего строения пути на разрезе Бородинский компании СУЭК (г. Красноярск). Исследования проводились по методике завода – изготовителя прибора «Профилометр мод. 130», ст. точности 1, ТУ 3943-001-7028127, изложенной в паспорте 130.0.01-ПС, с учетом рекомендаций ГОСТ 16263-70 и литературы [16].

Образцы характерных профилограмм приведены на рис. 1.

Таблица 1

R_z, мкм	R_a, мкм	h_{max}	R, мкм	b	ν	Δ	Примечания
320	-	380	16,23	0,62	1,6	31,6	Минимальная шероховатость (по ГОСТ 2789-73)
76,5	12,5	94	197,5	0,89	1,629	$51{,}13 \cdot 10^{-2}$	Новые профили
26,8	3,2	28,2	218	0,94	1,228	$13{,}65 \cdot 10^{-2}$	Рациональная шероховатость
3,99	0,78	4,55	793	1,78	1,83	$4{,}2 \cdot 10^{-3}$	Прираб. профили
1,322	0,367	2,015	2284	1,3	1,34	$0{,}73 \cdot 10^{-3}$	Прираб. профили
Параметры R, b и ν рассчитаны по методике, приведенной в [2].							

По методике, приведенной в работе [11] оценка велась по критериям Стьюдента и Фишера.

Из выполненных расчетов следует, что достоверность полученных результатов соответствует критерию Стьюдента при нормальном законе распределения (критерий Стьюдента) и достоверность полученных данных по критерию Фишера составляет 0,95.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Из выполненного на основании формул (6) и (7) исследования можно сделать вывод, что при высоких классах чистоты поверхности, т.е. при низкой шероховатости, с увеличением осевой нагрузки на колеса локомотивов коэффициент трения, и, следовательно, коэффициент сцепления, будут уменьшаться, а при контактировании грубо обработанных поверхностей – с увеличением осевой нагрузки коэффициент трения, а значит и коэффициент сцепления, будут увеличиваться.

Для определения характера изменения коэффициента трения для диапазона шероховатостей рабочих поверхностей системы колесо – рельс рассчитаем по формулам (6) и (7) их значения. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты трения в зависимости от характеристик взаимодействующих поверхностей

Класс чистоты	**Коэффициент трения f (HB380)**	**Фактич. площ. конт, мм^2**	**Тип контакта**	**Комплекс. показатель**	**Тип профиля**
R_z 320	*)	–	–	31,6	–
R_z 80	0,996	25,3	пластический насыщенный	$5{,}1 \cdot 10^{-1}$	новый
R_z 20	0,535	47,5	пластический насыщенный	$13{,}65 \cdot 10^{-2}$	обработанный с рац. шероховат.
R_z 3,2	0,478	22,9	упругий	$4{,}2 \cdot 10^{-3}$	приработанный
R_z 0,8	0,581	–	упругий	$0{,}73 \cdot 10^{-3}$	приработанный

*) При данной шероховатости, реализация контакта нецелесообразна вследствие значительных локальных напряжений в зоне взаимодействия бандажа с рельсом.

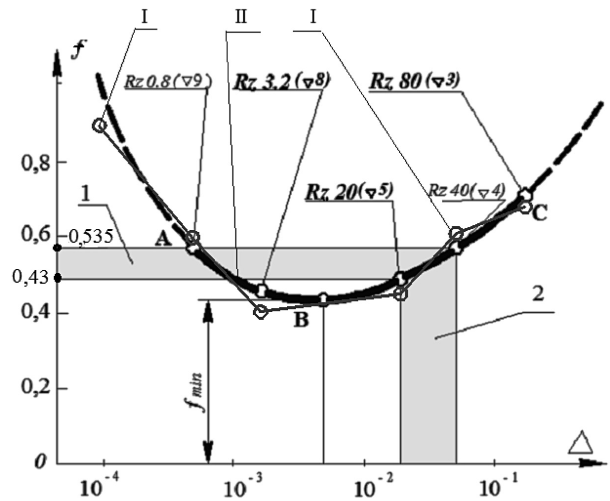

Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от комплексного показателя шероховатости: I – расчетная, II – аппроксимированная

На рис. 2 показана зависимость изменения коэффициента трения от комплексного критерия шероховатости Δ при осевой нагрузке 270 кН, характерной для карьерного железнодорожного транспорта. Анализ зависимости изменения $f_{тр}$ от Δ показывает, что при переходе от упругого контакта (зона *AB*) к пластическому (зона *BC*) коэффициент трения переходит через минимум (точка *B*). Точка *B* графика является точкой экстремума функции $f_{тр}$, что соответствует минимальному значению коэффициента трения, и, следовательно, коэффициента сцепления колеса локомотива с рельсом.

В машиностроении при проектировании узлов трения для уменьшения износа и увеличения долговечности, например – подшипников скольжения, основным критерием является минимизация коэффициента трения. 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 [9, с. 342].

Для пары колесо – рельс 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.

Установление рациональной шероховатости рабочих поверхностей пары колесо – рельс позволит теоретически спрогнозировать ожидаемое расчетное значение коэффициента сцепления карьерного локомотива.

Учитывая результаты экспериментальных исследований [12, с. 222] необходимо отметить, что при малых значениях комплексного показателя Δ, т.е. при высокой чистоте контактирующих поверхностей, при идентичных условиях взаимодействия, температура в зоне контакта значительно выше, чем при взаимодействии грубо обработанных поверхностей. Однако, с другой стороны, учитывая условия эксплуатации карьерных локомотивов (например, повышенные углы подъема выездных траншей) нельзя исключить вероятность повышенных скоростей пробуксовки колес локомотива, что приведет к дополнительному повышению температуры в зоне контакта системы колесо – рельс и повышению интенсивности износных процессов. Поэтому считается возможным ограничить шероховатость контактирующих рабочих поверхностей классом чистоты R_z 40–20 мкм (4–5), в отличие от ГОСТовской – R_z 80–40 мкм (3–4), (зона 2, рис. 2). При этом коэффициент трения может изменяться в диапазоне 0,43–0,535 (зона 1, там же). Такую шероховатость для взаимодействующих поверхностей системы колесо – рельс карьерных локомотивов автор считает целесообразным называть рациональной.

Анализ графика по рис. 2 позволяет предположить, что коэффициенты трения от 0,43 до 0,535 можно реализовать и при более высокой чистоте взаимодействующих поверхностей (левая часть графика). Однако, в связи с тем, что контакт шероховатых поверхностей имеет дискретный характер, как показали исследования, выполненные автором в работе [13], при высокой чистоте взаимодействующих поверхностей фактическая площадь контакта меньше, чем у грубо обработанных поверхностей (при одинаковых условиях эксплуатации). Это можно объяснить тем, что радиусы кривизны вершин неровностей чистых поверхностей вследствие износа значительно больше, чем у грубо обработанных. Вследствие этого на единицу площади контакта у грубых поверхностей приходится больше точек соприкосновения и, следовательно, тяговое усилие, определяемое коэффициентом трения, здесь будет больше [1, 14, 15]. Это подтверждается молекулярно-механической теорией трения И.А. Крагельского [1], согласно которой сила трения зависит, в конечном итоге, от фактической площади контакта взаимодействующих поверхностей.

Выводы

1. Установлено рациональное значение шероховатости при профилировке рельсов в пределах R_z 40–20 мкм, что способствует сокращению продолжительности процесса приработки пары колесо – рельс, что в свою очередь продлит срок эффективной эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта.

2. Установление рациональной шероховатости рабочих поверхностей пары колесо – рельс в свою очередь позволит определить ожидаемое расчетное значение коэффициента трения бандажа карьерного локомотива с рельсом.

3. Целесообразно продолжить исследования для обоснования целесообразности внесения необходимых изменений в государственные стандарты на колеса железнодорожного транспорта (в части требований к шероховатости рабочих поверхностей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Крагельский И.В., Михин Н.М.* Узлы трения машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
2. *Демкин Н.Б.* Контактирование шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
3. *Комбалов В.С.* Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. – М.: Наука, 1974. – 112 с.
4. *Лужнов Ю.М.* Нанотрибология сцепления колес с рельсами. – М.: Интекст, 2009. – 176 с.
5. *Флячинский К.П.* Влияние условий взаимодействия колеса и рельса на фрикционные процессы в зоне контакта. Дисс. на соискан. уч. ст. к.т.н. – Коломна, 1993, – С. 66.
6. *Крагельский И.В., Виноградова И.Э.* Коэффициенты трения. – М.: Машгиз, 1962. – 220 с.
7. *Крагельский И.В.* Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
8. *Трибология*. Исследования и приложения. Опыт США и стран СНГ / Под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. – М.: Машиностроение, 1993. – 452 с.
9. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 528 с.

10. *Демкин Н. Б.* Контактирование шероховатых поверхностей. — М.: Наука, 1970, — 227 с.
11. *Румшиский Л. З.* Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное руководство. — М.: Наука, 1971. — 192 с.
12. *Хусу А. П. и др.* Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. — М.: Наука, 1975. — 344 с.
13. *Керопян А. М.* Развитие теории взаимодействия и обоснование рациональных параметров системы колесо-рельс карьерных локомотивов в режиме тяги.: дисс. докт. тех. наук.— Екатеринбург, 2015. — 233 с.
14. *Демкин Н. Б.* Влияние приработки на деформационные свойства контакта / Межвузовский сборник научных трудов «Механика и физика фрикционного контакта». Вып. 9. Мин. обр. РФ. — Тверь: ТГТУ, 2002. — С. 4–7.
15. *Комбалов В. С.* Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. — М.: Наука, 1974. — 112 с.
16. *Схиртладзе А. Г., Радкевич Я. М.* Метрология, стандартизация и технические измерения. — Старый Оскол: ТНТ, 2010. — 420 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Керопян Амбарцум Мкртичевич[1] — кандидат технических наук, доцент, e-mail: am_kerop@mail.ru,
Вержанский Петр Михайлович [1] — кандидат технических наук, профессор,
Мостаков Валерий Александрович[1] — кандидат технических наук, профессор,
Басов Роман Константинович[1] — аспирант,
[1] Институт Экотехнологий и Инжиниринга («ЭкоТех») НИТУ «МИСиС».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 11, pp. 80–89.

UDC 621.8.053.8

A.M. Keropyan, P.M. Verzhanskiy, V.A. Mostakov, R.K. Basov

FRICTION COEFFICIENT IN THE WHEEL–RAIL CONTACT ZONE AS A FUNCTION OF ROUGHNESS OF INTERACTING SURFACES

Theoretical and practical study of the conditions of interaction of the working surfaces of bandages mining locomotives with rails and rational values defined roughness when profiling rails in order to reduce the duration of the process of running a pair of wheel – rail, which affects the increase in terms of the efficient operation of rail transport career.

Key words: coefficient of friction, surface roughness of rails and tires locomotives, complex index of roughness parameters of the reference curve, the radius of curvature of the asperity tips, rational roughness.

AUTHORS

Keropyan A.M.[1], Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: am_kerop@mail.ru,
Verzhanskiy P.M.[1], Candidate of Technical Sciences, Professor,
Mostakov V.A.[1], Candidate of Technical Sciences, Professor,
Basov R.K.[1], Graduate Student,
[1] Institute of Ecotechnology and Engineering, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia

REFERENCES

1. Kragel'skiy I. V., Mikhin N. M. Uzly treniya mashin. Spravochnik. (Friction units in machines. Handbook), Moscow, Mashinostroenie, 1984, 280 p.

2. Demkin N. B. *Kontaktirovanie sherokhovatykh poverkhnostey* (Contact of rough surfaces), Moscow, Nauka, 1970, 227 p.

3. Kombalov V. S. *Vliyanie sherokhovatosti tverdykh tel na trenie i iznos* (Effects of roughness of solids on friction and wear), Moscow, Nauka, 1974, 112 p.

4. Luzhnov Yu. M. *Nanotribologiya stsepleniya koles s rel'sami* (Nanotribology of wheel and rail grip), Moscow, Intekst, 2009, 176 p.

5. Flyachinskiy K. P. *Vliyanie usloviy vzaimodeystviya kolesa i rel'sa na friktsionnye protsessy v zone kontakta* (Effects of wheel and rail interaction on friction in the contact zone), Candidate's thesis, Kolomna, 1993, pp. 66.

6. Kragel'skiy I. V., Vinogradova I. E. *Koeffitsienty treniya* (Friction coefficients), Moscow, Mashgiz, 1962, 220 p.

7. Kragel'skiy I. V. *Trenie i iznos* (Friction and wear), Moscow, Mashinostroenie, 1968, 480 p.

8. *Tribologiya. Issledovaniya i prilozheniya. Opyt SShA i stran SNG.* Pod red. V. A. Belogo, K. Ludemy, N. K. Myshkina (Tribology. Research and applications. Experience of USA and CIS countries. Belyy V. A., Ludema K., Myshkin N. K. (Eds.)), Moscow, Mashinostroenie, 1993, 452 p.

9. Kragel'skiy I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* (Principles of friction and wear calculations), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 528 p.

10. Demkin N. B. *Kontaktirovanie sherokhovatykh poverkhnostey* (Contact of rough surfaces), Moscow, Nauka, 1970, 227 p.

11. Rumshiskiy L. Z. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta. Spravochnoe rukovodstvo* (Mathematical processing of experimental data. Reference guide), Moscow, Nauka, 1971, 192 p.

12. Khusu A. P. *Sherokhovatost' poverkhnostey. Teoretiko-veroyatnostnyy podkhod* (Roughness of surfaces. Theoretical-and-probabilistic approach), Moscow, Nauka, 1975, 344 p.

13. Keropyan A. M. *Razvitie teorii vzaimodeystviya i obosnovanie ratsional'nykh parametrov sistemy koleso-rel's kar'ernykh lokomotivov v rezhime tyagi* (Advancement in the theory of interaction and evaluation of rational parameters for wheel–rail system of open-pit locomotives in traction mode), Doctor's thesis, Ekaterinburg, 2015, 233 p.

14. Demkin N. B. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Mekhanika i fizika friktsionnogo kontakta», Vyp. 9. (Mechanics and physics of friction contact: Inter-university collection of papers, issue 9), Tver', TGTU, 2002, pp. 4–7.

15. Kombalov V. S. *Vliyanie sherokhovatosti tverdykh tel na trenie i iznos* (Effects of roughness of solids on friction and wear), Moscow, Nauka, 1974, 112 p.

16. Skhirtladze A. G., Radkevich Ya. M. *Metrologiya, standartizatsiya i tekhnicheskie izmereniya* (Metrology, standardization and industrial gaging), Staryy Oskol, TNT, 2010, 420 p.