



Математическое описание процесса изнашивания пары «колесо–рельс»



Бунькова Тамара Геннадьевна – Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия.*

Тамара БУНЬКОВА

Статья посвящена одной из актуальнейших проблем – определению оптимального соотношения твёрдости пары «колесо–рельс». Продолжительность службы колёс и рельсов в значительной степени обуславливается твёрдостью стали, используемой для их изготовления. Это подтверждается достаточно большим числом исследований, проведённых в нашей стране и за рубежом. Однако многие работы по изучению зависимости износостойкости от твёрдости проводились только на образцах из колёсной или рельсовой стали без должной оценки степени влияния прочности одного элемента на износостойкость другого в паре, моделирующей работу колеса и рельса.

Цель настоящей работы заключается в установлении оптимума между прочностными характеристиками железнодорожного колеса и рельса с учётом режимов эксплуатации. Пара «колесо–рельс» рассматривается как система. Была разработана математическая модель процесса изнашивания пары трения «колесо–рельс». При математическом моделировании использовался некомпозиционный ротатбельный план второго порядка. В статье представлены результаты исследований интенсивности изнашивания колеса и рельса и рекомендации по выбору осевой нагрузки и скорости движения подвижного состава.

Ключевые слова: транспорт, железная дорога, пара «колесо–рельс», математическое моделирование, соотношение твёрдости, изнашивание.

*Информация об авторе:

Бунькова Тамара Геннадьевна – инженер кафедры технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава, преподаватель кафедры вагонов и вагонного хозяйства Омского государственного университета путей сообщения, Омск, Россия, bunkovatg@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 02.05.2019, актуализирована 01.10.2019, принята к публикации 17.10.2019.

For the English text of the article please see p. 11.

ВВЕДЕНИЕ

Проблематика определения оптимального соотношения твёрдости в системе «колесо—рельс» существует ещё с момента возникновения железных дорог. Из триботехники известно, что лучшую износостойкость в трущейся паре проявляют металлы с примерно одинаковой твёрдостью. Но на протяжении многих лет в России соотношение твёрдости материала колеса и рельса менялось. В связи с этим требуются экспериментальные исследования в данной области.

Проведённый анализ существующей в настоящее время твёрдости цельнокатаного колеса и железнодорожного рельса по данным отечественных и зарубежных статей показал, что максимальная твёрдость колеса — в таких странах, как США, Бразилия, Канада (390 НВ), а рельса — в России (401 НВ). Оптимальное соотношение твёрдости материала колеса и рельса в России минимальное (0,86), а в странах Европы — максимальное (1,1) [1].

На рис. 1 представлены соотношения прочностных характеристик колеса и рельса по странам.

С целью определения рационального соотношения твёрдости пары трения «колесо—рельс» были проведены экспериментальные исследования с использованием установки на базе токарно-винторезного станка модели 1К62. В качестве образцов колеса использовались ролики из материала цельнокатаного колеса, а в качестве имитатора рельса — диск, изготовленный из материала рельса Р65. Твёрдость модели рельса оставалась постоянной и равной 401 НВ, что соответствует верхнему значению твёрдости рельса по ГОСТ Р 51685-

2013, а твёрдость модели колеса варьировалась в пределах 293–363 НВ в соответствии с ГОСТ 10791-2011 [2; 3].

В ходе экспериментальных исследований учитывались три важнейших фактора, влияющих на износ в паре трения «колесо—рельс», а именно:

- HV_k — твёрдость материала колеса;
- P_1 — вертикальная нагрузка на ось;
- P_2 — горизонтальная нагрузка на ось.

Эксперимент был поставлен для условий эксплуатации вагона в кривых участка пути.

В результате экспериментальных исследований были определены значения HV_k , P_1 и P_2 , обеспечивающие минимальные значения износа колеса и рельса. Так же было определено оптимальное соотношение твёрдости колеса и рельса $HV_k 363 / HV_p 401 = 0,91$, но для уточнения результатов требовалось проведение дополнительных экспериментальных исследований [4; 5].

РЕЗУЛЬТАТЫ

При движении в эксплуатации колесо меняет свою скорость от нуля до максимума, при торможении от максимума до нуля. Чтобы учесть эти особенности, а также наличие стыковых звеньев, была разработана новая испытательная установка, состоящая из двух устройств [6; 7].

Экспериментальная установка разработана на базе поперечно-строгального станка (рис. 2). Устройство (рис. 2а) состоит из образца колеса 1, установленного в центрах вилки 2, закреплённой в приспособлении на суппорте поперечно-строгального станка, и образца рельса 3. Образец колеса изготовлен из колёсной стали, профиль ко-

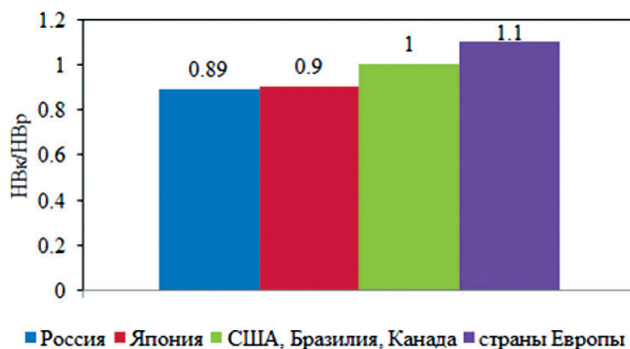


Рис. 1. Соотношения прочностных характеристик колеса и рельса по странам (данные автора).



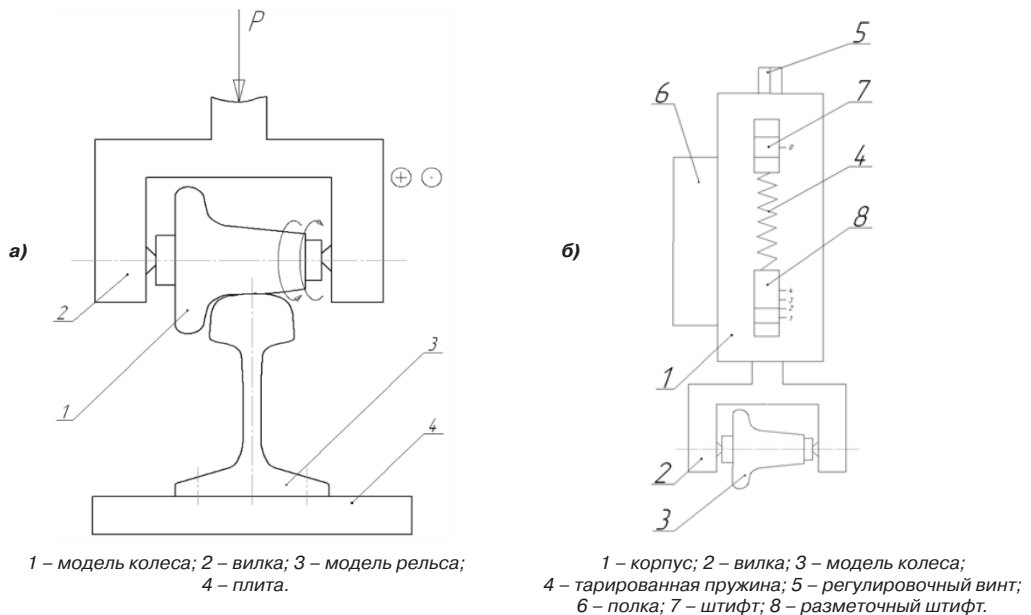


Рис. 2. Устройства для моделирования процесса движения колеса по рельсу (а) и процесса нагружения колеса на рельс (б).

того соответствует профилю катания колеса. Образец рельса изготовлен из рельсовой стали, жёстко закреплён на поперечно-строгальном станке при помощи плиты 4. Профиль образца рельса соответствует профилю натурального рельса. Для имитации стыкового соединения рельсов на образце рельса выполнен пропил в средней части, параллельный оси вращения образца колеса. К образцу колеса можно прикладывать вертикальные нагрузки (рис. 2б) и перемещать вдоль образца рельса. Размеры образцов колеса и рельса уменьшены в три раза.

В работах [8; 9] на основе анализа мирового опыта и экспериментальных работ сделан вывод: увеличение твёрдости колеса на одну единицу по Бринеллю в эксплуатационном интервале твёрдостей увеличивает их износостойкость на 1–2 %. Кроме того, контактно-усталостная долговечность колёс возрастает пропорционально квадрату приращения их твёрдости [10; 11].

Проведём на разработанной установке опыты, используя некомпозиционный ротатальный план, для рассмотрения износа колеса и рельса при условии равнозначности их твёрдости.

В данном случае математическую модель исследуемого процесса подбираем, начиная с простейшего линейного уравнения, последовательно увеличивая степень полино-

ма до получения адекватной модели. Процесс получения математической модели в данной ситуации осуществляется следующим образом. Сначала реализуется полный факторный эксперимент 2^k или эксперимент, представленный дробной репликой 2^{k-p} , где p – число эффектов взаимодействия, заменённых новыми переменными [12].

Следует отметить, что полиномом второго порядка часто удаётся описать исследуемый процесс. В случае неадекватности полинома второго порядка переходят к планированию полинома третьего порядка и описывают исследуемый процесс полиномом третьей степени.

Твёрдость образцов колеса и рельса примем за 440 единиц по Бринеллю. Значения скорости и нагрузки примем с учётом масштабных коэффициентов, предельные значения нагрузки $P_{\max} = 27$ тс, скорости $V_{\max} = 140$ км/ч.

Матрица планирования и результаты опытов представлены в таблице 1.

Уравнения регрессии, описывающие влияние нагрузки и скорости движения на износостойкость колеса Y_a , рельса Y_b :

$$Y_a = 0,075 + 0,0567x_1 - 0,0058x_2 - 0,01x_1^2 - 0,03x_2^2 - 0,346x_1x_2, \quad (1)$$

$$Y_b = 0,0475 + 0,0367x_1 + 0,0025x_1^2 - 0,0108x_2^2 - 0,346x_1x_2. \quad (2)$$

Поскольку гипотеза об адекватности не отвергается (выполняется условие $F_p < F_{\text{табл}}$),

Матрица планирования и результаты опытов

№ опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	P, Н	V, м/мин	Уа, г	Уб, мм
1	+1	+1	0	0	+1	0	1980	18	0,12	0,09
2	+1	-1	0	0	+1	0	420	18	0,01	0,01
3	+1	0,5	0,866	+0,433	+0,25	+0,75	1590	28,4	0,06	0,04
4	+1	0,5	-0,866	-0,433	+0,25	+0,75	1590	7,6	0,10	0,07
5	+1	-0,5	0,866	-0,433	+0,25	+0,75	810	28,4	0,03	0,04
6	+1	-0,5	-0,866	+0,433	+0,25	+0,75	810	7,6	0,01	0,01
7	0	0	0	0	0	0	1200	18	0,08	0,05
8	0	0	0	0	0	0	1200	18	0,07	0,04
9	0	0	0	0	0	0	1200	18	0,07	0,05
10	о	0	0	0	0	0	1200	18	0,08	0,05

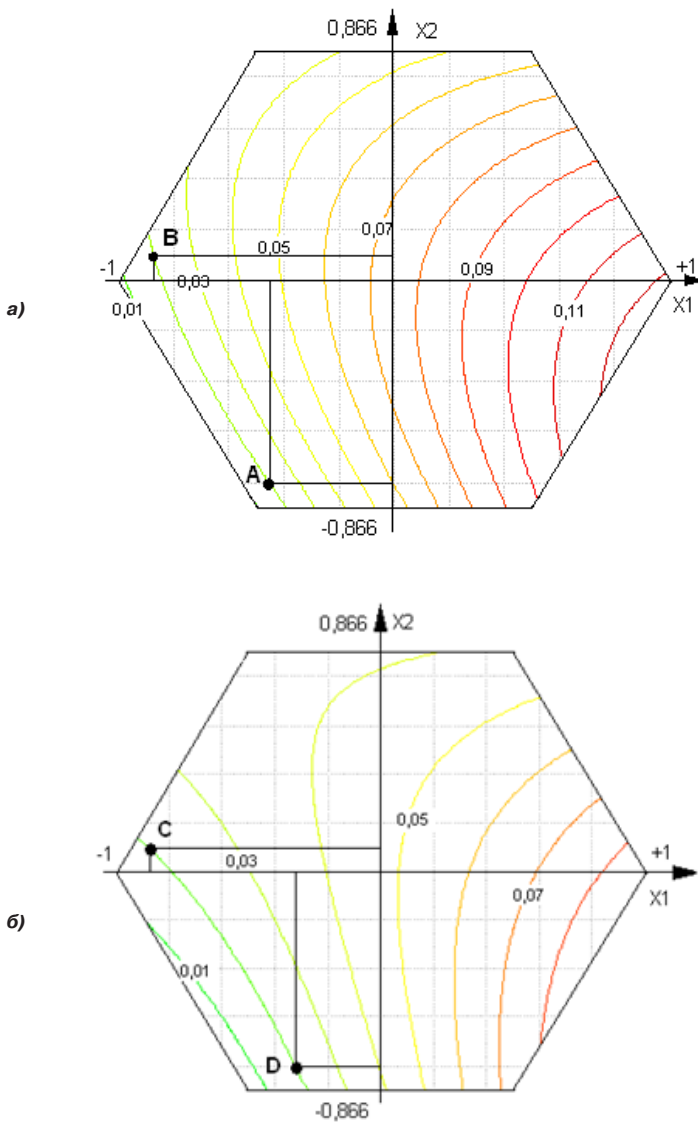


Рис. 3. Линии равного отклика износа колеса (а) и износа рельса (б).





уравнения регрессии можно использовать в качестве математической модели для определения износостойкости колеса и рельса [12].

Для графической интерпретации полученной модели были построены линии равного отклика (рис. 3а, б).

Используя линии равного отклика, можно подобрать значения скорости движения и вертикальной нагрузки, обеспечивающие минимальный износ и колеса, и рельса.

В натуральных значениях для точек А и В, которым соответствует значение износа 0,02 г (рис. 3а), получим:

Точка А:

$$P = 841,2 \text{ Н}; V = 8,4 \text{ м/мин.}$$

Точка В:

$$P = 513,6 \text{ Н}; V = 19,2 \text{ м/мин.}$$

С точки зрения увеличения нагрузки на ось, точка А является предпочтительнее, так как колесо выдерживает большую нагрузку при одном и том же значении износа, но точка В является предпочтительнее в связи с тенденцией увеличения скоростей движения грузовых вагонов.

На линиях равного отклика износостойкости рельса (рис. 3б) отметим две точки С(-0,88; 0,1) и D(-0,33; -0,8), соответствующие величине износа рельса 0,02 мм.

Для точки С получим:

$$P = 513,6 \text{ Н}; V = 19,2 \text{ м/мин.}$$

Для точки D:

$$P = 942,6 \text{ Н}; V = 8,4 \text{ м/мин.}$$

Сравнительный анализ контурных кривых поверхностей равного отклика по износу колеса и рельса показал, что снижение интенсивности изнашивания колёсной и рельсовой стали твёрдостью 440 НВ достигается при значениях скорости $V = 7,6\text{--}28,4$ м/мин и значениях нагрузки $P = 474,6\text{--}989,4$ Н (износ колеса 0,02 г, рельса 0,02 мм). Самый минимальный износ достигается при соотношениях нагрузки и скорости:

для колеса:

$$P_{\max} = 482,4 \text{ Н}; P_{\min} = 443,4 \text{ Н}; \\ V_{\max} = 18,36 \text{ м/мин}; V_{\min} = 16,2 \text{ м/мин};$$

для рельса:

$$P_{\max} = 864,6 \text{ Н}; P_{\min} = 505,8 \text{ Н}; \\ V_{\max} = 15,24 \text{ м/мин}; V_{\min} = 7,61 \text{ м/мин.}$$

ВЫВОД

Автором было показано, как практически применить методы некомпозицион-

ного планирования при математическом описании интенсивности изнашивания пары трения «колесо—рельс». В результате были получены математические модели, при помощи которых можно определять оптимальный износ в системе «колесо—рельс». Решение проблемы уменьшения износа колеса и рельса путём подбора рационального соотношения твёрдости проводилось с учётом эксплуатационных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бунькова Т. Г. Об оптимальном соотношении твёрдости цельнокатаного колеса грузового вагона и железнодорожного рельса // Научно-технический вестник Поволжья. — 2011. — № 1. — С. 86–90.
2. ГОСТ Р 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия». [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200105520>. Доступ 01.10.2019.
3. ГОСТ 10791-2011 «Колёса цельнокатаные. Технические условия». [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200085777>. Доступ 01.10.2019.
4. Ражковский А. А., Бунькова Т. Г., Петракова А. Г., Гателюк О. В. Оптимизация соотношения твёрдости пары трения «колесо—рельс» // Трение и износ / Международный научный журнал. — 2015. — № 4. — С. 433–442.
5. Razhkovskiy, A. A. Bunkova, T. G., Petrakova, A. G., Gateluk, O. V. Optimization of hardness ratio in rail-wheel friction pair. Journal of Friction and Wear, 2015, Vol. 36, Iss. 4, pp. 334–341.
6. Пат. 98070. Российская федерация, МПК G 01 М 17/10 (17/00) Устройство для имитации процесса движения колеса по рельсу / А. А. Ражковский, А. Г. Петракова, Т. Г. Бунькова; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. — № 2011125268; заявл. 20.06.2011; опубл. 20.11.2011. — 2 с.
7. Пат. 113839. Российская федерация, МПК G 01 М 17/10 Устройство для имитации процесса нагружения колеса на рельс / А. А. Ражковский, А. Г. Петракова, Т. Г. Бунькова; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. — № 2011131543/11; заявл. 27.07.2011; опубл. 27.02.2012. Бюл. № 6. — 2 с.
8. Марков Д. П. Закалка гребней колёс подвижного состава на высокую твёрдость для снижения бокового износа // Вестник ВНИИЖТ. — 1997. — № 1. — С. 45–51.
9. Богданов В. М., Марков Д. П., Пенькова Т. И. Оптимизация триботехнических характеристик гребней колёс подвижного состава // Вестник ВНИИЖТ. — 1998. — № 4. — С. 3–9.
10. Moreau, A. Characteristics of wheel/rail contact. Rail Engineering International, 1992, Iss. 3, pp 15–22.
11. Stone, D. H., Sawley, K. J., Kelly, D., Shust, W. Wheel/rail Materials and Interaction: North American Heavy Haul Practices. INHA 1999 STS Conference on Wheel/Rail Interaction, Moscow 1999, pp. 155–168.
12. Спиридонов А. А., Васильев Н. Г. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов: Учеб. пособие; Уральск. политехн. ин-т им. С. М. Кирова. — Свердловск, УПИ, 1975. — 140 с.