



Волнообразный износ рельсов при торможении



Сергей КАРГАПОЛЬЦЕВ
Sergey K. KARGAPOLTSEV

Пётр НОВОСЕЛЬЦЕВ
Petr V. NOVOSELTSEV



Юрий КУПЦОВ
Yuri A. KUPTSOV

Каргапольцев Сергей Константинович — доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия.

Новосельцев Пётр Викторович — кандидат технических наук, доцент Улан-Удэнского института железнодорожного транспорта — филиала ИрГУПС, Улан-Удэ, Россия.

Купцов Юрий Алексеевич — старший преподаватель УУИЖТ, Улан-Удэ, Россия

Rail Corrugation in the Process of Braking
(текст статьи на англ. яз. —
English text of the article — p. 51)

В процессе исследования определено, что основной причиной волнообразного износа следует признать колебание угловой скорости колёсной пары вагона при её торможении. При этом за один период происходит попеременно два события — упругое взаимодействие колеса и рельса и проскальзывание их относительно друг друга, из-за чего возникает трение и образуется впадина. Длина волны волнообразного износа увеличивается с увеличением скорости движения поезда, величины тормозного момента. Для снижения интенсивности износа рекомендуется увеличивать жёсткость рельсового пути, уменьшать тормозной момент и подбирать оптимальные параметры подвески.

Ключевые слова: железная дорога, волнообразный износ рельсов, колёсная пара, коэффициент сцепления, тормозной момент, продольная жёсткость пути, угловая скорость, проскальзывание, трение.

Согласно статистическим данным, поездная нагрузка (по пропуску тоннажа), выдерживаемая рельсом в течение срока его службы, варьируется от 100 млн до 2,5 млрд т брутто [1, 2]. Причиной такого широкого диапазона (25-кратного) в ресурсе рельсов становится, как правило, неудовлетворительная динамика системы «подвижной состав—путь» [3].

Анализ показывает, что максимальные величины динамических добавок давления колеса на рельс, возникающих при движении подвижного состава, создаются на 90 % за счёт неровностей пути [4–6]. Волнообразный износ поражает от 10 до 30 % рельсовых путей. По своей форме волнообразный износ делится на два характерных вида: короткие волны от 0,03 до 0,08 метра, отличающиеся наличием светлых горбов с чередующимися тёмными впадинами, и длинные волны (от 0,2 до 2 метров).

Зарождение волнообразного износа рельсов, по мнению ряда авторов [7, 8], связано:

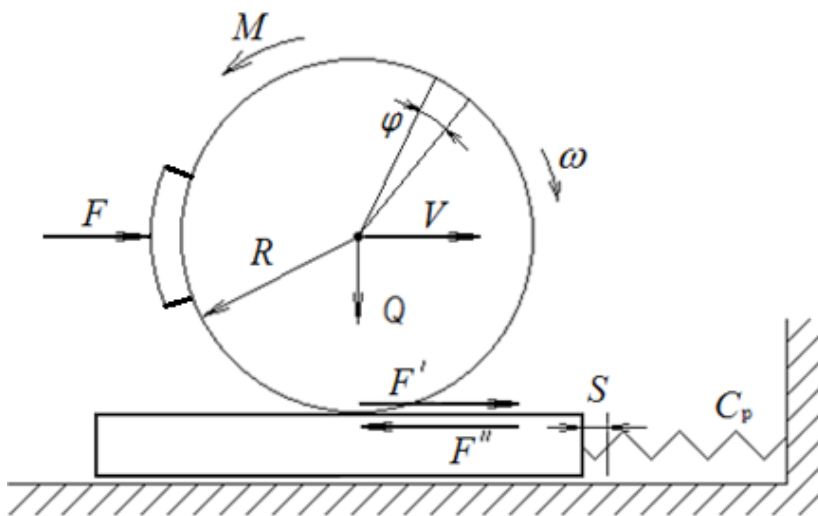


Рис. 1. Расчётная схема торможения колёсной пары.

— с неравномерностью распределения твёрдости металла по глубине и длине рельса;

- с остаточными напряжениями;
- с образованием неровностей на головке рельса при прокатке и холодной правке;
- с возникновением вертикальных толчков;
- с проскальзыванием колёс вагонов (особенно в кривых участках);
- с неравноупругостью подрельсового основания.

Названные причины, тем не менее, не дают ответа на главные вопросы:

- почему волнообразный износ не на всех участках?
- почему он имеет периодический характер?
- почему длина волны на различных участках различна?
- почему такой износ возникает не только на кривых, но и на прямых участках пути?

Попытаемся дать ответы на эти вопросы.

Рассмотрим процесс служебного торможения подвижного состава железных дорог, вызванного прижатием тормозной колодки к поверхности катания колеса. При этом колесо продолжает вращаться, но из-за трения возникают силы при взаимодействии колодки и колеса, а также колеса с рельсом.

Угловая скорость колеса ω_0 согласована с линейной скоростью V центра колеса, равной скорости вагона:

$$\omega_0 = \frac{V}{R}, \quad (1)$$

где R — радиус колеса (м).

При торможении согласование по уравнению (1) становится невозможным; замедление вращения колеса идет интенсивнее, чем замедление вагона.

Процесс взаимодействия колёсной пары и рельсового пути при торможении происходит следующим образом (рис. 1):

— под действием тормозного момента M угловая скорость ω_0 колёсной пары уменьшается;

— со стороны колеса на рельс действует сила сцепления F' :

$$F' = Q \cdot \psi, \quad (2)$$

где Q — вертикальная нагрузка от веса подвижного состава, приходящаяся на колесо, ψ — коэффициент сцепления;

— под действием силы F' совершается деформация рельсового пути, вследствие чего в рельсе возникает сила упругости:

$$F'' = C_p \cdot S, \quad (3)$$

где C_p — продольная жёсткость пути (Н/м); S — продольная деформация пути (м); и эта сила упругости благодаря сцеплению колеса и рельса действует на колёсную пару:

$$F'' = C_p \cdot \phi_1 \cdot R, \quad (4)$$

где ϕ_1 — дополнительное малое угловое перемещение при колебании колёсной пары;

— в случае, когда сила упругости превышает силу сцепления, возникает проскальзывание; со стороны рельса на колёсную пару будет действовать сила трения движения:



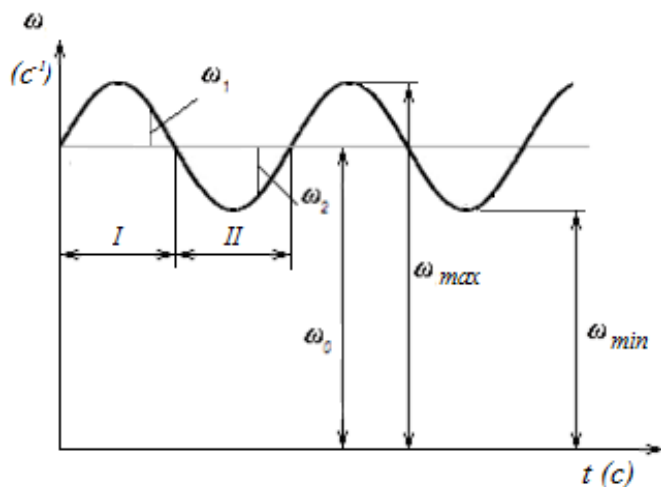


Рис. 2. График изменения угловой скорости колёсной пары при установившемся режиме торможения.

$$F = Q \cdot f, \quad (5)$$

где f — коэффициент трения движения, который меньше коэффициента сцепления между колесом и рельсом: $f < \psi$.

Во время срыва сцепления и возникающего проскальзывания угловая скорость $\omega = \omega_0 + \omega_2$ колёсной пары уменьшается. При проскальзывании продольная сила, действующая со стороны колеса, снижается, и энергия сжатия, накопленная в рельсе, заставляет его двигаться в противоположном направлении скольжению. Как известно, при сухом трении коэффициент трения уменьшается с увеличением скорости проскальзывания, что способствует скольжению колеса по рельсу. Когда накопленная в рельсе энергия деформации уменьшается, и за счёт силы упругости рельс движется обратно, взаимное проскальзывание снижается и восстанавливается сцепление колеса с рельсом. Сила, действующая на колесо со стороны рельса, увеличивается, и угловая скорость вращения колёсной пары уменьшается.

При этом колесо проскальзывает относительно тормозной колодки с изменяющейся по периодическому закону скоростью. В этой колебательной системе тоже имеется определённая жёсткость.

В результате столь сложного взаимодействия возникают колебательные движения колеса и рельса с периодическим проскальзыванием.

На рис. 2 представлен график изменения угловой скорости вращения колёсной пары в некоторый малый промежуток времени, когда уменьшение угловой скорости враще-

ния колеса ω_0 незначительно. Здесь ω_1 — изменение угловой скорости колёсной пары в режиме малых колебаний при упругом взаимодействии с рельсом; ω_2 — изменение угловой скорости колёсной пары в режиме малых колебаний при проскальзывании.

Рельсовый путь в режиме малых колебаний колёсной пары при торможении состава является упругой связью, то есть колёсная пара и рельсовый путь составляют колебательную систему. Дифференциальное уравнение этой системы при упругом взаимодействии:

$$\frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + K_1^2 \cdot \varphi_1 = \frac{M}{J}, \quad (6)$$

где φ_1 — угол поворота колёсной пары при малых колебаниях в период упругого взаимодействия; J — осевой момент инерции колёсной пары ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$).

В данном уравнении K_1 есть собственная частота колебаний системы «колёсная пара — рельсовый путь»:

$$K_1^2 = \frac{C_p \cdot R^2}{J}. \quad (7)$$

Как видно из уравнения (7), K_1 зависит от продольной жёсткости C_p рельсового пути; при её уменьшении собственная частота K_1 уменьшается. Величина C_p при ухудшении технического состояния рельсового пути снижается.

Решение дифференциального уравнения (6) имеет вид:

$$\varphi_1 = \frac{M}{J \cdot K_1^2} \cdot (1 - \cos K_1 \cdot t). \quad (8)$$

Уравнение (6) справедливо до тех пор, пока сила сцепления колеса с рельсом

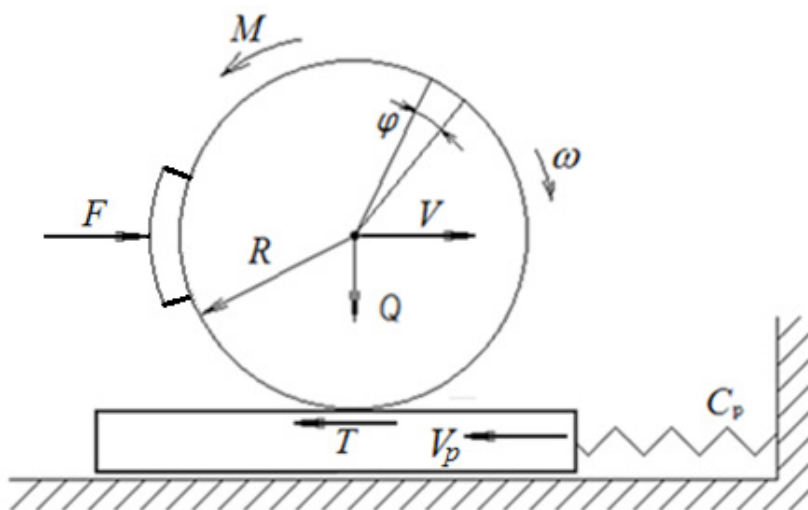


Рис. 3. Расчётная схема системы «колёсная пара – рельсовый путь» в процессе проскальзывания.

больше силы упругости рельсового пути. Это выражается неравенством:

$$Q \cdot \psi \geq C_p \cdot \varphi_1 \cdot R. \quad (9)$$

В противном случае происходит срыв сцепления и возникает проскальзывание. Из уравнения (9) находим угол, при котором вероятен срыв сцепления:

$$\varphi_1 = \frac{Q \cdot \psi}{C_p \cdot R}. \quad (10)$$

Подставив (9) в (8), получим условие равновесия в системе «колёсная пара – рельсовый путь»:

$$\frac{Q \cdot \psi}{C_p \cdot R} = \frac{M}{J \cdot K_1^2} (1 - \cos K_1 t). \quad (11)$$

Время t_1 , когда может произойти срыв сцепления:

$$t_1 = \frac{1}{K_1} \arccos \left(1 - \frac{Q \cdot \psi \cdot J \cdot K_1^2}{C_p \cdot R \cdot M} \right). \quad (12)$$

Рассмотрим пример, в котором дано: $Q = 22 \cdot 10^4$ Н; $\psi = 0,3$; $J = 400$ кг·м²; $C_p = 125 \cdot 10^6$ Н/м; $R = 0,5$ м; $M = 2,5 \cdot 10^4$ Н·м. Следует определить время упругого взаимодействия колёсной пары и рельса.

Предварительно вычислим собственную частоту K_1 по формуле (9):

$$K_1 = \sqrt{\frac{125 \cdot 10^6 \cdot 0,5^2}{400}} = 279 \text{ с}^{-1}.$$

Затем время по формуле (12):

$$t_1 = 0,00677 \text{ с}.$$

Точка, лежащая на ободу колеса, за время $t_1 = 0,00677$ с пройдёт путь:

$$\Delta S_1 = V \cdot t_1,$$

где V – скорость движения поезда (м/с), ΔS_1 – часть рельсового пути, на котором происходит его упругое взаимодействие с колёсной парой, и одновременно она же является частью длины волны волнообразного износа.

В нашем примере при $V = 10$ м/с:

$$\Delta S_1 = 10 \cdot 0,00677 = 0,0677 \text{ м}.$$

Угловая скорость проскальзывания колёсной пары при движении её в режиме малых колебаний в момент времени t_1 равна:

$$\omega_1 = \dot{\varphi}_1 = \frac{M}{J \cdot K_1} \sin K_1 t_1.$$

В нашем примере при $t_1 = 0,00677$ с:

$$\omega_1 = \frac{2,5 \cdot 10^4}{400 \cdot 279} \sin(279 \cdot 0,00677) = 0,21 \text{ с}^{-1}.$$

После срыва сцепления на колёсную пару действует тормозной момент M и силы трения скольжения со стороны рельса. При этом рельс вращает колёсную пару по направлению движения поезда (рис. 3).

На рис. 3 сила трения движения:

$$T = Q \cdot f, \quad (13)$$

где f – коэффициент трения движения, который меньше коэффициента сцепления; V_p – скорость обратного движения рельса.

Дифференциальное уравнение движения колёсной пары вагона при её работе в режиме проскальзывания:

$$J \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} = M - Q \cdot f \cdot R. \quad (14)$$





Решение уравнения (14):

$$\varphi_2 = \frac{M \cdot t^2}{2 \cdot J} - \frac{Q \cdot f \cdot R \cdot t^2}{2 \cdot J} + C_1 \cdot t + C_2. \quad (15)$$

Исходим из начального условия: если $t = 0$, $\varphi_2 = 0$, то $C_2 = 0$.

Для определения C_1 найдём выражение для угловой скорости:

$$\dot{\varphi}_2 = \frac{M \cdot t}{J} - \frac{Q \cdot f \cdot R \cdot t}{2} + C_1. \quad (16)$$

Начальное условие состоит в том, что угловая скорость $\dot{\varphi}_2$ при $t = 0$ равна угловой скорости ω_1 в момент срыва сцепления. Это следует из того, что средняя угловая скорость колёсной пары при торможении в малый промежуток времени должна быть постоянной, то есть: $\omega_0 = \text{const}$.

Это показано на рис 2. Угловая скорость ω_1 подставляется в уравнение (16), то есть $\dot{\varphi}_2 = -\omega_1$.

Теперь начальное условие имеет вид: если $t = 0$; $\dot{\varphi}_2 = \omega_1$; $C_2 = -\omega_1$. (17)

Получаем:

$$\dot{\varphi}_2 = \frac{M \cdot t}{J} - \frac{Q \cdot f \cdot R \cdot t}{J} - \omega_1. \quad (18)$$

Далее имеем:

$$2 \cdot \omega_1 = \frac{M \cdot t_2}{J} - \frac{Q \cdot f \cdot R \cdot t_2}{J}. \quad (19)$$

Найдём время t_2 проскальзывания. Примем коэффициент трения скольжения $f = 0,15$.

Из предыдущего примера $\omega_1 = 0,21 \text{ с}^{-1}$;

$$t_2 = \frac{2 \cdot \omega_1 \cdot J}{M - Q \cdot f \cdot R} = \frac{2 \cdot 0,21 \cdot 400}{2,5 \cdot 10^4 - 22 \cdot 10^4 \cdot 0,15 \cdot 0,5} = 0,02 \text{ с}.$$

Точка, лежащая на ободе колеса, при скорости V поезда пройдет путь: $\alpha_2 = V \cdot t_2$.

При $V = 10 \text{ м/с}$ (или 36 км/ч):
 $\alpha_2 = 10 \cdot 0,02 = 0,2 \text{ м}.$

Таким образом, длина впадины при волнообразном износе:

$\alpha_2 = 0,2 \text{ м}.$

В целом длина волны в нашем примере при скорости $V = 10 \text{ м/с}$:

$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = 0,067 + 0,2 = 0,267 \text{ м}.$

В работе [7, с. 47] указано, что до шлифовки рельсов более 61 % неровностей имеют длину волны от 0,3 до 0,6 м. Результаты, представленные в нашем примере (длина волны 0,267 м), близки к названным.

ВЫВОДЫ

1. Торможение остаётся одной из причин, вызывающих волнообразный износ рельсов.

2. Причиной волнообразного износа становится периодическое проскальзывание колеса по рельсам, связанное с тем, что система взаимодействия колесо—рельс является колебательной [8].

3. Длина волны волнообразного износа зависит от скорости движения поезда, при её увеличении она растёт.

4. Скорость проскальзывания, а следовательно, и интенсивность износа рельсов зависят от величины тормозного момента, при его увеличении растут и последствия.

5. Скорость проскальзывания зависит и от технического состояния рельсового пути, при его ухудшении проскальзывание усиливается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути с изменениями и дополнениями в соответствии с Указаниями МПС России № С-950 от 30.05.2000 г. (23456789) ЦП- 774.
2. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса: Пер. с англ. / У. Дж. Харрис, С. М. Захаров, Дж. Лангрен, Х. Турне, В. Эберсен. — М.: Интекст, 2002. — 408 с.
3. Шилер А. В. Оценка эффективности шлифовки поверхности катания рельсов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2012. — № 2. — С. 111–115.
4. Кулагин М. И., Кац Э. И., Тюриков В. Н. Волнообразный износ рельсов. — М.: Транспорт, 1970. — 145 с.
5. Лазарян В. А., Данович В. Д., Манашкин Л. А. Вынужденные колебания вагонов по периодическим неровностям пути // Труды ДИИТ. — 1969. — Вып. 99. — С. 26–31.
6. Gozbenko V. E., Kargapol'tsev S. K., Kornilov D. N., Minaev N. V., Karlina A. I. Definition of the main coordinates of the car with two-level spring suspension. International Journal of Applied Engineering Research. 2016. T. 11. № 20. Pp. 10367–10373.
7. Тимофеева Л. А., Огульчанская Н. Р. Причины возникновения волнообразного износа поверхности катания рельсов железнодорожного пути и методы его устранения // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2015. — № 3. — С. 56–58.
8. Новосельцев В. П., Новосельцев П. В., Гордеева А. А. Влияние продольной жёсткости пути на проскальзывание колёсной пары локомотива по рельсу // Мир транспорта. — 2013. — № 4. — С. 34–38. ●

Координаты авторов: **Каргапольцев С. К.** — kck@irgups.ru, **Новосельцев П. В.** — nov-pv@mail.ru, **Купцов Ю. А.** — yourakupcov@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 08.05.2017, принята к публикации 24.07.2017.