

УДК 629.4.015:625.1.03

<https://doi.org/10.34185/tpm.3.2021.03>

Афанасов А.М., Голік С.М., Васильєв В.Є., Мунтян А.О.

Моделювання фактора зношування гребенів колісних пар локомотивів з урахуванням умов зчеплення

Afanasov A., Holik S., Vasilyev V., Muntian A.

Modeling of wear factor of locomotive wheel flange taking into account the traction conditions

Проблема зношування гребенів колісних пар вирішується від моменту виникнення рейкового транспорту протягом багатьох років. Особливо актуальна вона на магістральних залізницях.

З метою оцінки впливу умов зчеплення на зношування гребенів коліс локомотивів під час руху рейковою колією у статті запропоновано математичну модель. Вона була отримана на основі кінематичної схеми взаємодії колеса з рейкою.

В якості фактора зношування було прийнято роботу сил тертя, яка припадає на одиницю пройденого шляху. Як відомо, фактор зношування гребеня прямо пропорційний відносному ковзанню, яке залежить від умов зчеплення та може бути визначене за значенням відносного ковзання поверхні кочення напрямного колеса та геометричними параметрами вписування в криву.

В результаті було отримано модель, яка пов'язує фактор зношування з параметрами кінематичної схеми взаємодії колеса з рейкою та дозволяє врахувати умови зчеплення.

Запропонована модель дозволяє вдосконалити моделювання взаємодії колії та рухомого складу і процес проектування пристроїв, які забезпечують зниження інтенсивності зносу гребенів рухомого складу і рейок.

Ключові слова: ЛОКОМОТИВ, ГРЕБЕНІ КОЛІС, ФАКТОР ЗНОШУВАННЯ, УМОВИ ЗЧЕПЛЕННЯ, ВІДНОСНЕ КОВЗАННЯ, БУКСУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Since the advent of railways for nowadays the problem of wear of wheel flange isn't completely solved. It is especially relevant on the main railways.

In this paper the mathematical model is proposed for impact assessment of traction conditions on the wear of the flanges of locomotive wheels during the movement of the rail track. It was obtained on the basis of the kinematic scheme of interaction of the wheel with the rail.

As a factor of wear was taken the work of friction forces per unit distance traveled. It is well known, the wear factor of the flange is directly proportional to the relative sliding, which depends on the traction conditions and can be determined by the value of the relative sliding surface of the guide wheel and the geometric parameters of the curve.

Thus the model that relates the wear factor to the parameters of the kinematic scheme of interaction of the wheel with the rail and allows to take into account a traction conditions was obtained.

The proposed model allows to improve the modeling of the interaction of track and rolling stock as well as the design process of devices that reduce the intensity of wear of the flanges and rails.

LOCOMOTIVE, FLANGE, WEAR-OUT FACTOR, TRACTION CONDITIONS, RELATIVE SLIDING, SLIPPAGE, MATHEMATICAL MODEL

Вступ.

Проблема зношування гребенів коліс рухомого складу та рейок залізниць має давню історію і виникла разом із зародженням залізничного транспорту. Рішенням даної проблеми займалися протягом багатьох років як окремі видатні вчені, так і цілі науково-дослідницькі колективи. За цей період накопичено величезний досвід як з моделювання взаємодії колії та рухомого складу, так і з проектування пристроїв, які забезпечують зниження інтенсивності зносу гребенів рухомого складу і рейок.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми.

Аналіз існуючих варіантів можливого рішення даної проблеми показує, що один з важливих факторів, яким є умови зчеплення, дотепер розглядався як такий, що безумовно впливає на знос бандажа і рейок, але не є лімітуючим [1–9]. Такий підхід було обумовлено загальною тенденцією нарощування потужності тягового рухомого складу та збільшенням маси поїздів. При цьому не приймалось до уваги, при якому фізико-хімічному стані поверхні рейок та яким методом досягається збільшення коефіцієнта зчеплення,

що реалізується.

Однак результати багатьох досліджень показують, що значення вагових норм, які встановлені на ряді ділянок, часто не відповідають реальним значенням фізичного коефіцієнта зчеплення. Проходження таких ділянок супроводжується застосуванням штучних методів поліпшення зчеплення, найбільш поширеним з яких є підсипання піску.

Суттєве погіршення зчеплення спостерігається у кривих ділянках колії з малими значеннями радіуса кривих. Тобто саме за тих умов, які являються найбільш несприятливими з точки зору зношування гребенів через наявність великих значень направляючого зусилля та кута набігання колеса на рейку. Використання піску в кривих у режимі реалізації граничних сил зчеплення, які характеризуються збільшеним проковзуванням, в поєднанні з перерахованими вище факторами приводить до багатократного зростання показника зносу [1].

Існуючою практикою водіння поїздів використання піску ніяк не лімітується, а сама витрата піску не контролюється. Часто подача піску застосовується машиністами, як превентивна міра,

ще до появи буксування. Самі правила визначення вагових норм передбачають використання піску. Отже, подолання розрахункових підйомів з поїздами нормованої маси за метеорологічних умов, які відрізняються від нормальних, зазвичай супроводжується підсипкою піску.

З огляду на умови експлуатації локомотивів, що безперервно змінюються, точний статистичний аналіз впливу умов зчеплення на інтенсивність зношування гребенів ускладнений. Однак досвід спостережень за зношуванням рейок показує на те, що найбільший їх знос припадає на ділянки зі складним планом та профілем колії, причому на тих ділянках, де не застосовується рекуперативне гальмування, спостерігається збільшення зносу рейок на підйомах у порівнянні зі зношуванням на спусках [3].

Одним з найбільш негативних наслідків використання піску є зведення практично до нуля ефективності змащування гребенів коліс рухомого складу та рейок. Як практика, так і розрахунки показують, що використання змащування гребенів та бокових граней рейок трохи погіршують умови зчеплення [10]. Таким чином, існує протиріччя, яке полягає у тому, що подолання ділянок із складним профілем і, як правило, планом колії з використанням змащування гребенів вимагає додаткових заходів поліпшення зчеплення, а саме – подачі піску.

Мета і завдання дослідження.

З аналізу, що наведено вище випливає необхідність створення моделі, яка б дозволила оцінювати знос гребенів коліс локомотивів з урахуванням умов зчеплення. В процесі створення моделі побудуємо кінематичну схему взаємодії колеса з рейкою. На основі отриманої схеми встановимо аналітичний взаємозв'язок між відносним ковзанням поверхні катання прямого колеса, а отже фактором зношування та геометричними параметрами вписування в криву. На основі отриманого аналітичного виразу дослідимо характер впливу зчепних властивостей локомотивів на інтенсивність зношування гребенів колісних пар.

Матеріали та методи дослідження.

Розглянемо вплив умов зчеплення на зношування гребенів за допомогою найуживанішого енергетичного критерію. В якості фактора зношування приймемо роботу сил тертя, яка припадає на одиницю пройденого шляху [9,11]

$$\Phi = \frac{A}{L}, \quad (1.1)$$

де A – робота сили тертя;

L – величина пройденого шляху.

Враховуючи, що потужність втрат на тертя дорівнює добутку сили тертя на швидкість ковзання, після перетворення формули (1.1) отримаємо

$$\Phi = \varepsilon_{\Gamma} F_{\Gamma\Gamma}, \quad (1.2)$$

де ε_{Γ} – відносне ковзання в точці контакту гребеня з рейкою;

$F_{\Gamma\Gamma}$ – сила тертя в точці контакту.

$$\varepsilon_{\Gamma} = \frac{v_{\Gamma}}{v_O}, \quad (1.3)$$

де v_{Γ} – швидкість ковзання гребеня по рейці;

v_O – поступальна швидкість центра колеса.

Сила тертя в контакті

$$F_{\Gamma\Gamma} = f \cdot N, \quad (1.4)$$

де f – коефіцієнт тертя;

N – нормальне зусилля в контакті.

За формулою (1.2) фактор зношування гребеня прямо пропорційний відносному ковзанню ε_{Γ} , яке залежить від умов зчеплення та може бути визначене за значенням відносного ковзання поверхні катання прямого колеса ε_K та геометричними параметрами вписування в криву.

На рисунку 1.1 наведена кінематична схема взаємодії колеса з рейкою. В точці A поверхня катання колеса контактує з рейкою. У разі вільного кочення без проковзування швидкість точки A дорівнює нулю, за наявності тягового моменту точка A проковзує по поверхні рейки зі швидкістю v_K . При цьому миттєвий центр швидкостей колеса пересувається з точки A в точку A_0 . В точці M відбувається контактування гребеня колеса з боковою гранню рейки із випередженням, рівним b . Величина випередження визначається за формулою [9]

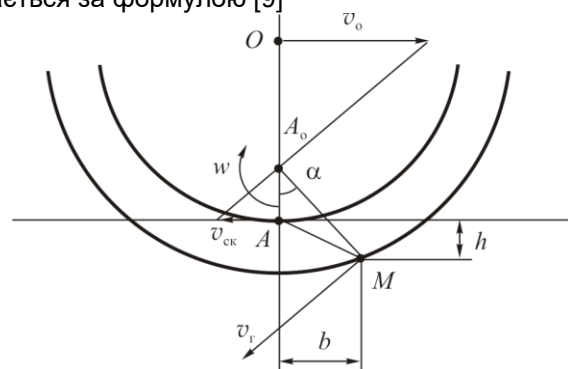


Рисунок 1.1 – Кінематична схема взаємодії колеса з рейкою

$$b = \frac{D_K}{2} \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (1.5)$$

де D_K – діаметр колеса;

θ – кут нахилу гребеня;

α – кут набігання колеса на рейку.

Згідно схеми на рисунку 1.1 швидкість ковзання гребеня

$$v_{\Gamma} = \omega \cdot |A_0 M|, \quad (1.6)$$

де ω – кутова швидкість колеса, яку можна знайти за формулою

$$\omega = \frac{v_0}{D_K/2 - C}, \quad (1.7)$$

де C – ордината миттєвого центра швидкостей

$$C = \frac{D_K \cdot \varepsilon_K}{2(1 + \varepsilon_K)}, \quad (1.8)$$

де ε_K – відносне ковзання поверхні катання колеса

$$\varepsilon_K = \frac{v_K}{v_0}, \quad (1.9)$$

де v_K – швидкість ковзання поверхні катання у точці A .

За умови роботи в зоні пружного ковзання (рис. 1.2) та відносних проковзуваннях, менших критичного $\varepsilon_{\text{ККР}}$ ($\varepsilon_{\text{ККР}} \approx 0,02$) [11], формула (1.8) може бути перетворена до вигляду

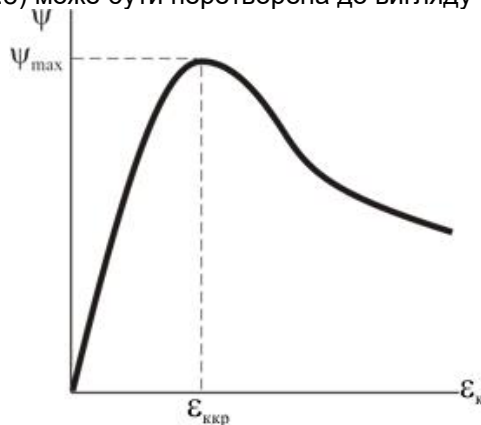


Рисунок 1.2 – Характеристика зчеплення

$$C = \frac{D_K}{2} \cdot \varepsilon_K. \quad (1.10)$$

За тих же умов формула (1.7) буде мати вигляд

$$\omega = \frac{2v_0}{D_K}. \quad (1.11)$$

Відстань від миттєвого центру швидкостей до точки контакту гребеня колеса з рейкою буде рівна

$$|A_0 M| = \sqrt{b^2 + (C + h)^2}, \quad (1.12)$$

де h – глибина точки контакту гребеня з рейкою, яка визначається геометрією поверхнею пари колесо-рейка, а також величиною кута набігання.

Об'єднавши формули (1.2) – (1.6), (1.11), (1.12), отримаємо математичну модель для визначення фактора зношування гребеня

$$\Phi = \frac{2fN}{D_K} \sqrt{b^2 + (C + h)^2}. \quad (1.13)$$

Нормальне зусилля N може бути виражено у функції від направляючого зусилля [9,11]

$$N = \frac{Y}{v \cdot \sin \theta}, \quad (1.14)$$

де $v = 1 - f \cdot \operatorname{ctg} \theta \cdot \sin \alpha$;

θ – кут нахилу гребеня колеса;

α – кут AA_0M (див. рис. 1.1).

Кут α буде збільшуватись з ростом кутів набігання δ та нахилу гребеня θ , і збільшується зі зростанням відносного ковзання ε_K .

Використовуючи формулу (1.13), дослідимо характер та ступінь впливу зчепних властивостей локомотивів на інтенсивність зношування гребенів колісних пар у зоні пружного ковзання характеристики зчеплення.

Знайдемо залежність фактора зношування від відносного проковзування ε .

Для зручності аналізу будемо розглядати відносний показник, приведений до фактора зношування за відсутності проковзування

$$\Phi_{\text{отн}} = \frac{\Phi}{\Phi_0}, \quad (1.15)$$

де Φ_0 – базовий показник зношування при $\varepsilon = 0$.

Тут необхідно відзначити, що навіть за відсутності тягового зусилля в кривій може спостерігатися проковзування зовнішнього колеса через різницю відстані, яку проходять колеса однієї пари по зовнішній та внутрішній рейках, але, як правило, під час вибігу проковзує внутрішнє колесо [11–13].

Аналіз залежності фактора зношування від проковзування будемо проводити за формулою (1.13). Розглянемо зміну відносного проковзування ε в межах від нуля до 0,02. Такий інтервал зміни ε відповідає нормальним умовам реалізації сили тяги без буксування. Кут набігання колеса на рейку δ будемо розглядати в межах від нуля до 0,02. Коефіцієнт тертя f та направляюче зусилля Y будемо вважати незалежним від проковзування ε .

Таким чином параметр $\frac{\Phi}{\Phi_0}$ за формулою (1.15) буде визначатися відповідним співвідношенням відстаней $|A_0 M|$ за формулою (1.12).

Результати дослідження.

В таблиці 1.2 наведені результати розрахунків

параметра $\frac{\Phi}{\Phi_0}$ для різних значень проковзуван-

ня ε та кута набігання δ . В розрахунках глибина контакту h була прийнята рівною 10 мм.

Таблиця 1.2 – Залежності параметра $\frac{\Phi}{\Phi_0}$ від відносного проковзування ε

ε	Φ/Φ_0				
	$\delta = 0$	$\delta = 0,005$	$\delta = 0,01$	$\delta = 0,015$	$\delta = 0,02$
0	1	1	1	1	1
0,005	1,3	1,19	1,09	1,05	1,03
0,01	1,6	1,38	1,19	1,1	1,07
0,015	1,9	1,59	1,31	1,16	1,11
0,02	2,2	1,81	1,43	1,24	1,15

Графічно залежності $\frac{\Phi}{\Phi_0} = F(\varepsilon)$ для різних значень кута набігання представлені на рисунку 1.3.

Обговорення результатів.

З рисунку 1.3 видно, що найбільша ступінь зростання фактора зношування гребеня при пе-

реході від вибігу на режим тяги відповідає мінімальному куту набігання $\delta = 0$. Тобто тій умові, за якої абсолютне значення фактора зношування мінімальне. У разі малих значень δ , як відомо, невелике і направляюче зусилля Y .

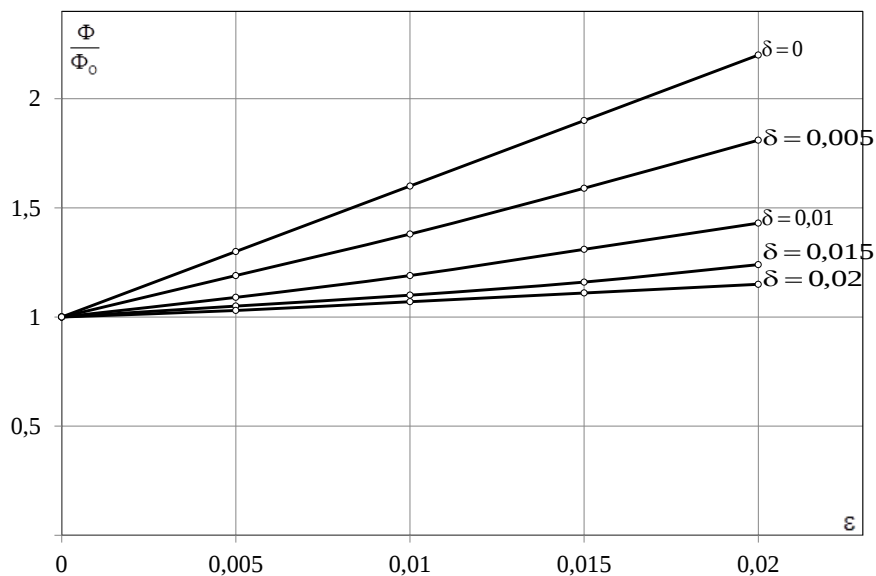


Рисунок 1.3 – Залежність Φ/Φ_0 від відносного ковзання

У випадку більших кутів набігання δ , за яких абсолютне значення фактора зношування максимальне, збільшення проковзування від нуля до найбільшого значення 0,02 призводить до збільшення параметра Φ всього лише на 15%.

Висновки.

Отримана модель (1.13) дозволяє встановити, що саме по собі високе тягове зусилля, яке реалізується локомотивом без буксування, тобто

при $\delta \leq 0,02$, не може бути причиною наднормативного зносу гребенів колісних пар, яке спостерігається на ділянках мережі залізниць із складним планом та профілем колії.

Слід також відмітити, що причиною значного збільшення фактора зношування гребенів колісної пари є подача піску до початку її буксування, у якості превентивної міри.

Бібліографічний опис.

1. Мустяц В.Ф. Износ деталей колесных пар на Украине / В.Ф. Мустяц, В.П. Есаулов, А.В. Сладковский. // Локомотив. – 1996. – № 7. – С. 43...44.
2. Шевалин В.А. Критерий бокового износа рельсов и гребней бандажей электровозов в кривых / В.А. Шевалин. // Тр. ЛИИЖТа. – Л.: 1941. – Вып. 135. – С. 36.
3. Исаков И.Ф. Экономические расчеты по конструкциям верхнего строения пути. / И.Ф. Исаков. – Днепропетровск, 1967. – 60 с.

4. Шахунянц Г.М. Расчеты верхнего строения пути. / Г.М. Шахунянц. – М.: Трансжелдориздат, – 1959. – 157 с.
5. Klimenko I., Kalivoda J., Neduzha L. Influence of Parameters of Electric Locomotive on its Critical Speed. *Transbaltica XI: Transportation Science and Technology : Proc. of the Intern. Conf. Transbaltica*, May 2–3, 2019, Vilnius. Springer, Cham, 2020. P. 531...540. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_56.
6. Tatarinova, V. A. Research of locomotive mechanics behavior / V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha. // *Наука та прогрес транспорту*. – 2018. – № 5. – С. 104...114. – DOI: 10.15802/stp2018/148026.
7. Мелентьев Л.П. Исследование причин бокового износа рельсов в кривых / Л.П. Мелентьев. // *Тр. ЦНИИ МПС*. – 1958. – Вып. 154. Трансжелдориздат.
8. Mathematical Simulation of Spatial Oscillations of the "Underframe-Track" System Interaction: [pre-print] / I. Klimenko, L. Černiauskaite, L. Neduzha, O. Ochkasov. // *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems – ITELMS'2018 : The 12th International Conference*, April 26–27, 2018, Panevėžys / Kaunas University of Technology. – Kaunas, 2018. – P. 105...114.
9. Андриевский С.М. Боковой износ рельсов на кривых. / С.М. Андриевский. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 127 с.
10. Курасов Д.А. Повышение долговечности бандажей колесных пар подвижного состава. / Д.А. Курасов. – М.: Транспорт, 1981. – 159 с.
11. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
12. Блохин Е.П., Данович В.Д., Коротенко М.Л. Влияние поперечного зазора в рельсовой колее на износ гребней колесных пар грузовых вагонов в кривых / Е.П. Блохин, В.Д. Данович, М.Л. Коротенко. // *Залізничний транспорт України*. – 1997. – № 2-3. – С. 9.
13. Вериго Н.Ф. Причины роста интенсивности бокового износа рельсов и гребней колес. / Н.Ф. Вериго. – М.: Транспорт, 1992. – 45 с.

References

1. Mustyats V.F. Iznos detaley kolesnykh par na Ukraine / V.F. Mustyats, V.P. Esaulov, A.V. Sladkovskiy. // *Lokomotiv*. – 1996. – № 7. – С. 43...44.
2. Shevalin V.A. Kriteriy bokovogo iznosa relsov i grebney bandazhey elektrovozov v krivyykh / V.A. Shevalin. // *Tr. LIIZhTa*. – L.: 1941. – Vyip. 135. – С. 36.
3. Isakov I.F. Ekonomicheskie raschety po konstruktsiyam verhnego stroeniya puti. / I.F. Isakov. – Dnepropetrovsk, 1967. – 60 s.
4. Shahunyants G.M. Raschety verhnego stroeniya puti. / G.M. Shahunyants. – M.: Transzheldorizdat, – 1959. – 157 s.
5. Klimenko I., Kalivoda J., Neduzha L. Influence of Parameters of Electric Locomotive on its Critical Speed. *Transbaltica XI: Transportation Science and Technology : Proc. of the Intern. Conf. Transbaltica*, May 2–3, 2019, Vilnius. Springer, Cham, 2020. P. 531–540. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_56.
6. Tatarinova, V. A. Research of locomotive mechanics behavior / V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha // *Nauka ta progres transportu*. – 2018. – № 5. – С. 104–114. – DOI: 10.15802/stp2018/148026.
7. Melentev L.P. Issledovanie prichin bokovogo iznosa relsov v krivyykh / L.P. Melentev. // *Tr. TsNII MPS*. – 1958. – Vyip. 154. Transzheldorizdat.
8. Mathematical Simulation of Spatial Oscillations of the "Underframe-Track" System Interaction: [pre-print] / I. Klimenko, L. Černiauskaite, L. Neduzha, O. Ochkasov // *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems – ITELMS'2018 : The 12th International Conference*, April 26–27, 2018, Panevėžys / Kaunas University of Technology. – Kaunas, 2018. – P. 105–114.
9. Andrievskiy S.M. Bokovoy iznos relsov na krivyykh. / S.M. Andrievskiy. – M.: Transzheldorizdat, 1961. – 127 s.
10. Kurasov D.A. Povyishenie dolgovechnosti bandazhey kolesnykh par podvizhnogo sostava. / D.A. Kurasov. – M.: Transport, 1981. – 159 s.
11. Verigo M.F., Kogan A.Ya. Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava. / M.F. Verigo, A.Ya. Kogan. – M.: Transport, 1986. – 559 s.
12. Blohin E.P., Danovich V.D., Korotenko M.L. Vliyanie poperechnogo zazora v relsovoy kolee na iznos grebney kolesnykh par gruzovykh vagonov v krivyykh / E.P. Blohin, V.D. Danovich, M.L. Korotenko. // *Zallzничний транспорт UkraYini*. – 1997. – № 2-3. – С. 9.
13. Verigo N.F. Prichiny rosta intensivnosti bokovogo iznosa relsov i grebney koles. / N.F. Verigo. – M.: Transport, 1992. – 45 s.