

Кульбовський І.І., канд. техн. наук, Демченко В.О., канд. техн. наук

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗМІН УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВЗАЄМОДІЮЧОЇ ПАРИ РЕЙКА-КОЛЕСО НА ЗНОС ПОВЕРХНІ КОЧЕННЯ В ПРОЕКТАХ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Анотація. Розглянуто вплив умов експлуатації на знос поверхні кочення рейки, проаналізовані причини змін та вплив різних типів рухомого складу на залізничну колію в різні роки експлуатації.

Ключові слова: транспорт, колісна пара, рейка, навантаження, стійкість руху, вимірювання, лазерний профілометр.

Аннотация. Рассмотрено влияние условий эксплуатации на износ поверхности качения рельса, проанализированные причины изменений и влияние разных типов подвижного состава, на железнодорожный путь в разные годы эксплуатации.

Ключевые слова: транспорт, колесная пара, рельс, нагрузка, стойкость движения, измерения, лазерный профилометр.

Annotation. Influence of external on the wear of surface of woobling of rail environments, analysed reasons of changes and influence of different types of rolling stock, is considered on a railway way in the different years of exploitation.

Key words: transport, wheelpair, rail, loading, firmness of motion, measuring, laser profilometr.

В теперішній час широко проводяться дослідження проблеми зниження силової та фрикційної взаємодії в системі «рейка-колесо», що окрім економічної складової, має значний вплив на безпеку руху. Актуальність цього питання пов'язана з витратами на заміну рейок і коліс локомотивів внаслідок підвищеного зносу цієї пари. Якщо в 1980-х роках термін роботи бандажів колісних пар локомотивів становив 5-6 років, то наприкінці 1990-х років термін роботи бандажів зменшився до 2-2,5 років. При тому, якщо в 70-80-х роках

минулого століття знос поверхні кочення появлявся у вигляді сідлоподібної виїмки, то після 1990-х років він набув рівномірного характеру включно до гранично допустимого по всій довжині поверхні катання аж до гребеня колеса. Схема типового зносу поверхні катання бандажів наведена на (рис. 1).

Характерним зносом бандажа в 1960-1980 роках був знос поверхні катання (прокат) бандажа (рис. 1). Через збільшення навантаження на вісь змінилась конструкція верхньої будови колії. Відбувся перехід з рейок колії Р-50, яка мала ширину головки 70 мм, на рейку Р-65 з шириною головки 75 мм. Відстань між внутрішніми гранями колісних пар (насадка коліс) не змінювалась ($1440^{\pm 3}$ мм) [1].

В локомотивному господарстві в 90-х роках середній знос гребеня колісної пари локомотива на 10 тисяч км становив понад 1 мм, причому в літній період знос становив майже 3 мм, для порівняння на початку 80-х років знос складав лише 0,15 мм [2].

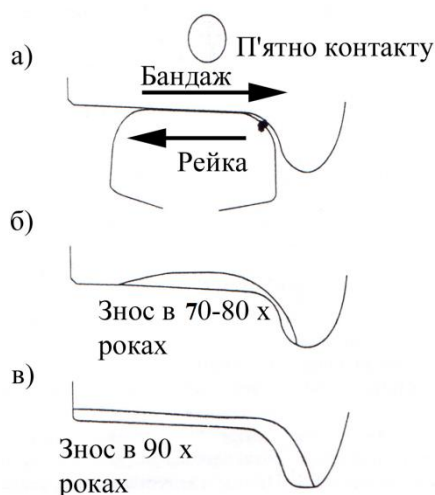


Рисунок 1 – Схема зносу поверхні бандажа колісної пари в різний період експлуатації

Вихід рейок через граничний боковий знос за такий же період збільшився в 3 рази [3]. Аналіз робіт по проблемі взаємодії рейок та коліс рухомого складу [4], [5], [6], показав, що причина інтенсивного зносу рейок та бандажів залежить не лише від стану колії, а ще від технічних характеристик і технічного стану рухомого складу.

В зв'язку із вказаним у низки фахівців, особливо у фахівців в галузі рухомого складу [7], стала виникати стійка впевненість, що причиною збільшення інтенсивності зносу коліс і рейок є зменшення ширини рейкової колії на 4 мм. Але це твердження не є обґрунтованим.

Як вказано в [8] введення нормативу $S=1520^{+6}_{-4}$ мм. взамін нормативу $S=1524^{+6}_{-4}$ мм. було здійснено на вітчизняних залізницях в 1971 році після тривалих досліджень ВНДІЗТу, і ЛПЗТу і головним результатом такого впровадження стало покращення взаємодії рейкової колії з колісними парами рухомого складу за рахунок зменшення зазорів між гребенями коліс та рейками, що в свою чергу призвело до зменшення поперечних переміщень колісних пар під час руху та зменшенню величини бокових сил.

Для того щоб з'ясувати істинні причини такого явища, яке проявилось в збільшенні інтенсивності зносу коліс і рейок, спробуємо більш ретельно проаналізувати не тільки умови взаємодії пари колесо-рейка, але також зміни в умовах експлуатації вказаної пари що взаємодіє між собою та зміни вихідних технічних характеристик коліс рухомого складу та рейок.

Для збільшення пропускної спроможності залізниць у 80-х роках було вжито низку заходів. Одним із таких заходів було збільшення осьового навантаження, що вкрай негативно вплинуло на стан пари «рейка-колесо» [9], [10]. На рис. 2 наведено значення осьового навантаження різних типів тягового рухомого складу, із графіку видно що вантажні локомотиви які знаходяться в експлуатації 2ТЕ116, 2ТЕ10, ВЛ80 мають більше навантаження від осі в порівнянні з ТЕ3, ВЛ8.

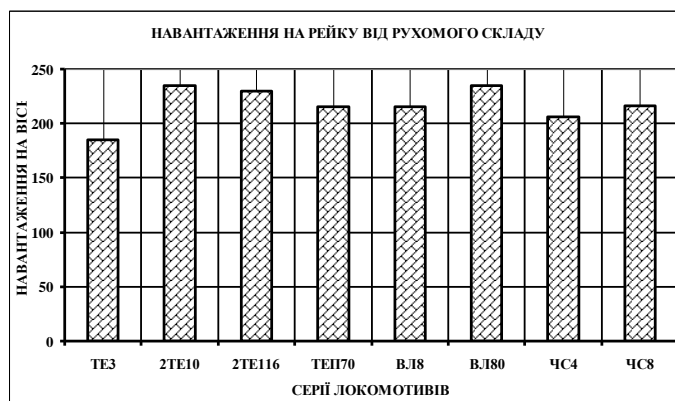


Рисунок 2 – Графік навантаження від колісної пари на рейку різних типів тягового рухомого складу

Для забезпечення встановлених швидкостей руху, перевезення поїздів збільшеної маси значно була збільшена потужність локомотивів і не лише задіяних у вантажному русі, а також значно збільшилась потужність

пасажирських локомотивів, на рис. 3 наведено значення потужності різних серій локомотивів які експлуатуються в Україні.

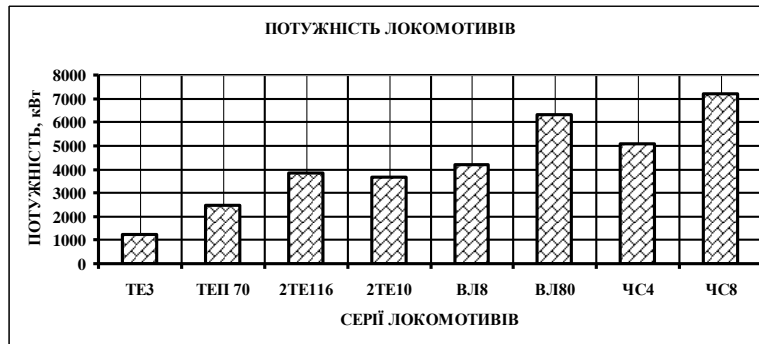


Рисунок 3 – Графік збільшення потужності локомотивів

За рахунок збільшення потужності локомотивів в рази, зросла і сила тяги яка передається через одну колісну пару. Такий фактор як зростання тяги, що передається через одну колісну пару дуже негативно впливає на знос поверхні рейки та колеса. Саме внаслідок його на поверхні головки рейки концентруються великі дотичні контактні напруження, що перевищують межу текучості металу, і в результаті починають виникати тріщини та відшарування. Схема виникнення дефектів на поверхні кочення рейки наведена на рис 4 [11].

Коротко викладемо явища які виникають на поверхні кочення рейки та поверхні катання колісної пари, в п'ятні контакту, в момент руху локомотива по рейках. Контактуючі поверхні колеса та рейки намагаються зміститись відносно одне одного. Виникаючі сили міжмолекулярної взаємодії викликають пружні, або пружно-пластичні деформації [12, 13].

Аналізуючи схему рис. 1.4 напруження в зоні контакту приводять до подовження поверхні кочення рейки, результатом є переміщення шарів мікроструктури рейки. Виникає проковзування, яке називається боксуванням. Через виникаючі деформації рейки та колеса за один оберт воно проходить меншу відстань від його довжини кола катання.



Рисунок 4 – Наслідки збільшення сили тяги одиночної колісної пари, зміщення волокон поверхні контакту рейки та колеса

Під час руху в режимі тяги волокна коліс пружно проковзують по волокнах рейки виникає пружне проковзування яке називається крипом. На рис. 1.4 викладено явище поздовжнього крипу, для поперечного крипу суть процесу аналогічна. Більш детальне викладення контактної взаємодії рейки та колеса і стійкості руху викладено в другому розділі дисертаційної роботи та в роботі [14].

На рис. 5 приведений графік який показує як значно збільшилась сила тяги одного колісно-моторного блоку магістральних локомотивів які використовуються як в пасажирському так і в вантажному русі.

Зростання сили тяги колісно-моторного блоку можливе в двох випадках: коли змінюється передаточне число, або збільшується потужність тягового електродвигуна локомотива.



Рисунок 5 – Сила тяги одного колісно-моторного блоку локомотива

Із технічних характеристик декількох серій локомотивів що експлуатуються в Україні стає зрозумілим, що потужність тягових електричних двигунів (ТЕД) також збільшилась в рази, для прикладу, у тепловоза серії ТЕЗ та електровоза серії ВЛ80 потужність електричного двигуна зросла в 4 рази. Графік збільшення потужності ТЕД наведено на рис. 6.

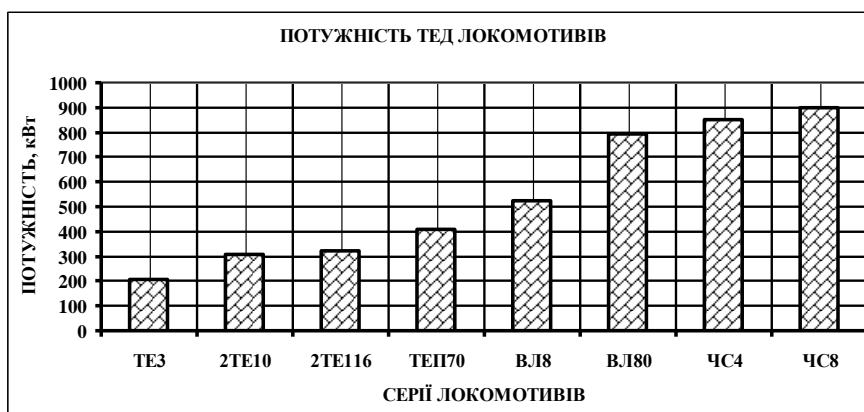


Рисунок 6 – Потужність тягових електродвигунів декількох серій локомотивів

Аналізуючи дані (табл. 1, 2) та роботи науковців по вивченню зносу пари рейка-колесо слід акцентувати увагу що на інтенсивність зносу впливає зовсім не зміна ширини рейкової колії, а декілька інших дуже вагомих причин: по-перше – це зростання одиничної потужності колісно-моторних блоків локомотивів, по-друге – це збільшення навантаження на осі колісних пар. Результатом такого збільшення на залізницях України в 90-х роках з'явилося те, що знос рейок збільшився в 3-4 рази в порівнянні з 1970-ми роками, витрати на ремонт колії зросли в 4-5 разів, збільшення потужності колісно-моторних блоків призвело до збільшення витрат піску на 30-35 %, а це як результат додаткового зносу бічної поверхні рейок та коліс рухомого складу.

Таблиця 1 – Основні технічні характеристики тягового рухомого складу

Основні характеристики	Одиниці виміру	Серії локомотивів							
		ТЕЗ	2ТЕ10	2ТЕ116	ТЕП70	ВЛ8	ВЛ80	ЧС4	ЧС8
Навантаження на вісь	кН	190	230	226	215	225	235	206	216
Конструктивна швидкість	км/год	100	100	100	160	80	110	160	160
Сумарна потужність на валах ТЕД	кВт	1236	3684	3840	2466	4200	6320	5100	7200
Маса локомотива	т	119	138	139	129	138	192	126	176
Рік початку випуску	-	1953	1973	1972	1973	1953	1980	1965	1983
Сила тяги що припадає на одну вісь	кВт	206	307	320	411	525	790	850	900

Таблиця 2 – Статичне навантаження на колію від різних моделей вагонів

Показники	Вантажопідіймність, т	Навантаження на 1 погонний метр колі, т/м	Навантаження від колісної пари на рейку, кН	Конструкційна швидкість км/год	Кількість колісних пар
Криті вагони 11-270	68,5	6,18	228	120	4
Напіввагони 12-132	75	7,18	245	120	4
Спеціалізовані напіввагони 12-1592	71	6,63	225,4	120	4
Вагони платформи 13-4012	71	6,32	228	120	4
Цистерна	120	8,1	215	120	8
Цистерна для бензину	62	6,4	216	120	4

Виникнення зносу поверхні кочення рейок виникає внаслідок пластичної деформації в зоні контакту рейки та колеса, критерієм деформації є рівень контактних напружень в головці рейки. Приведемо тут результати визначення контактних напружень в зоні контакту рейки та колеса розрахунковим методом. Результати розрахунків для коліс нового стандартного профілю, та профілю з пробігом докладно наведені в роботі [15]. На рис. 7 наведена графічна залежність виникаючих контактних напружень в головці рейки від вертикального навантаження коліс рухомого складу які мають різний ступінь зносу.

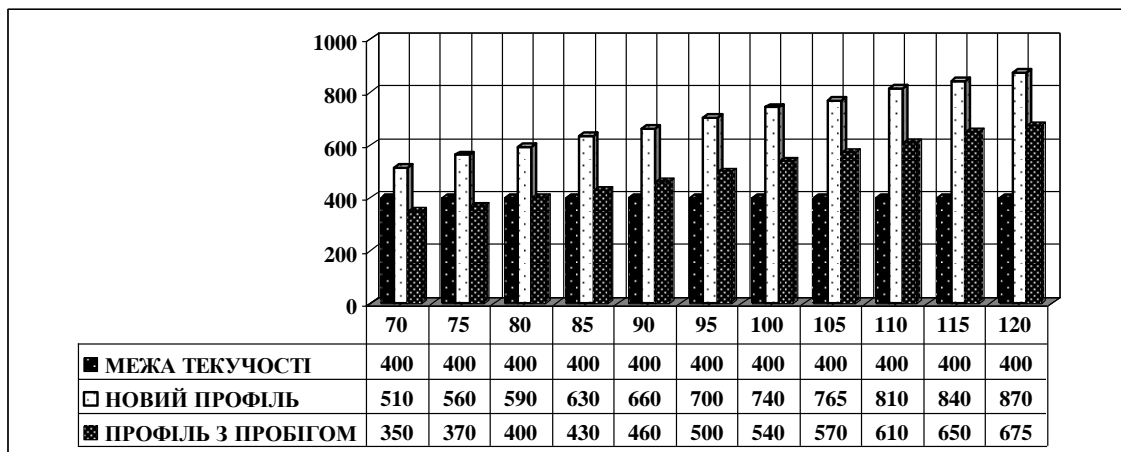


Рисунок 7 – Контактні напруження в головці рейки залежно від вертикального навантаження та стану поверхні кочення колісної пари

Як показує аналіз результатів досліджень [15] в експлуатації профілі колісних пар зношуються, змінюється форма контакту та його площа, все це призводить до зменшення контактних напружень, але рівень таких напружень

залишається вище границі текучості, що є однією із причин виникнення хвилеподібних нерівностей на поверхні кочення рейки.

Українські залізниці мають значно складніші умови експлуатації в порівнянні із європейськими залізницями, через рух по одних магістральних лініях вантажних та пасажирських поїздів.

В мережі залізниць України експлуатується рухомий склад із значним навантаженням на вісь колісної пари локомотиви пасажирські від 205 кН до 220 кН, локомотиви вантажні від 230 кН до 250 кН, відповідно встановленим інструкціям на залізничних магістралях України прийняті максимальні швидкості руху для різних категорій поїздів, для пасажирських поїздів 140 км/год, рефрижераторних поїздів 120 км/год, вантажних поїздів 90 км/год. Додаткові вимоги до руху пасажирських поїздів із швидкостями більше 140 км/год встановлюється відповідною інструкцією Державної адміністрації залізничного транспорту України. Залізницями України які мають експлуатаційну довжину колії 22,5 тисячі км виконується значний об'єм перевезень. В Європі залізниці України посідають четверте місце, а в світі одинадцяте за експлуатаційною довжиною колії.

За час незалежності України Укрзалізниця виконала великий обсяг робіт по модернізації колійного господарства.

Сучасний стан колійного господарства українських залізниць характеризується досить високими показниками.

Протяжність безстикової колії за той же період зросла на 24,5% і нині складає 71% від загальної протяжності головних колій; кількість стрілочних переводів на залізобетонних брусах зросла на 44,5% і на даний час складає біля 47% від загальної кількості стрілочних переводів, вкладених на усіх коліях Укрзалізниці, при цьому на головних коліях переводів на залізобетоні більше 71%. На рис. 8 показана динаміка впровадження сучасних конструкцій верхньої будови колії на залізницях України.

Від стану верхньої будови колії залежить швидкість руху поїздів, безперебійність руху потягів, допустимі навантаження на вісь вагонів і локомотивів, об'ємів перевезень на дільницях колії, безпека руху поїздів. Від безпечної та якісної роботи насамперед колійного господарства залежить забезпечення безперервного та безпечного руху поїздів і з встановленими швидкостями.

З аналізу змін характеристик конструкції верхньої будови колії (ВБК) на вітчизняних залізницях можна бачити, що найбільш характерними рисами модернізації колій на залізницях України стало підвищення потужності ВБК, перехід на більш потужні рейки Р65, впровадження більш жорстких конструкцій підрейкової основи, а також впровадження більш твердих і більш зносостійких термозміцнених рейок на головних коліях мережі залізниць України.

З позицій взаємодії пари «колесо-рейка» особливе значення в питаннях інтенсивності зносу обох взаємодіючих елементів займає співвідношення мас, що приймають участь в взаємодії, а також співвідношення жорсткостей механічних систем, що представляють собою конструкції колії та рухомого складу, і крім того питання співвідношення твердості безпосередньо в контакті колеса і рейки.

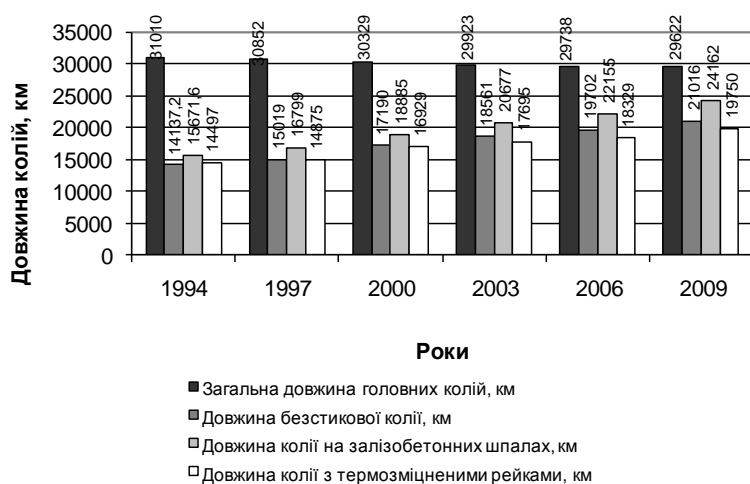


Рисунок 8 – Динаміка впровадження сучасних конструкцій верхньої будови колії (ВБК) на головних коліях Укрзалізниці

Питання співвідношення твердості поверхні кочення колеса і рейки набуло останнім часом гостроту через те, що спеціалісти рухомого складу звернули увагу на те що в колію почали вкладатись термічно зміцнені рейки з твердістю 341-388 од. НВ. В такому випадку логічно було б збільшувати і твердість колісних пар, але при цьому потрібно витримувати встановлене раніше раціональне співвідношення між твердістю рейки та колеса 1,1-1,2 / 1,0 на користь рейки. Результати виміру зносу гребенів і поверхні кочення бандажа (прокат) показали, що із зменшенням товщини гребеня в результаті його фізичного зносу до товщини 30-29 мм, подальша інтенсивність його зносу

значно знижується. Це свідчить про те, що передача сили тяги через гребінь зменшується, так як збільшується відстань між внутрішніми поверхнями гребенів колісної пари.

Висновки

Таким чином в результаті виконаного аналізу можна зробити наступні висновки щодо причин збільшення зносу:

1. По рухомому складу:

1.1. За період з 1970-х до 1990-х рр. суттєво збільшилась потужність локомотивів;

1.2. Зросли навантаження від коліс на рейки у локомотивів і вагонів;

1.3. Збільшилась потужність тягових двигунів для кожного колісно-моторного блоку локомотивів;

1.4. Сила тяги в довготривалому режимі, що передає одна колісна пара електровоза в порівнянні з тепловозом збільшилась більше, ніж в 3 рази;

1.5. Розрахункова швидкість в довготривалому режимі збільшилась майже в 2,7 раз;

1.6. З переходом на інший тип рейки залишилась незмінною відстань між внутрішніми гранями бандажів колісних пар.

1.7. Змінився коефіцієнт тертя в контакті рейки та колеса;

1.8. Відхилення від нормативних вимог в бік збільшення, геометричних параметрів установки колісних пар при виготовлення та в експлуатації;

1.9. Перевищення встановлених норм по різниці діаметрів поверхні катання коліс, однієї колісної пари;

1.10. Наявність розбалансування ресорного підвішування та опорно-повертаючих пристроїв;

1.11. Змінилось співвідношення якості і твердості металу колісних пар та рейок;

1.12. Використання різних методів зміцнення коліс і рейок, їх хімічний склад, мікроструктура;

1.13. Особливість зміни кута нахилу гребеня бандажа в експлуатації залежно від типу профілю та ступенем зносу колісної пари;

1.14. Значне забруднення та пошкодження контактуючих поверхонь системи «рейка-колесо»;

1.15. Негативний вплив атмосферних умов на знос поверхонь рейки та колеса.

1.16. При гальмуванні вагони в середній частині поїзда в рейковій колії встановлюються з перекосом в результаті набігання хвостових вагонів, а гребені колісних пар починають інтенсивно взаємодіяти з бічними гранями рейок.

2. По конструкції верхньої будови колії:

2.1. Збільшилась потужність і маса конструкцій колії, що приймає участь при взаємодії пари колесо-рейка;

2.2. Збільшилась жорсткість підрейкової основи, за рахунок впровадження залізобетонних шпал;

2.3. Збільшилась твердість поверхні кочення рейок, що взаємодіють з колесами, за рахунок широкого впровадження термозміцнених рейок;

2.4. Відповідно зі збільшенням вертикальних навантажень від коліс рухомого складу на рейки та з урахуванням збільшення потужності тягових двигунів від кожного колісно-моторного блоку локомотивів – збільшилися величини контактних дотичних напружень в верхніх шарах головки рейки і внаслідок цього зросла інтенсивність накопичення контактно-втомлювальних дефектів і знос верхніх шарів поверхні кочення залізничних рейок;

2.5. Зменшилися нормативи ширини колії в прямих та кривих ділянках радіусом менше 350 м. з 1524_{-4}^{+6} мм (до 1971 р.) на 1520_{-4}^{+6} мм (в 1971 р.) і на 1520_{-4}^{+8} мм (в 1996 р.).

Результати аналізу багатьох наукових досліджень [16], [17] свідчать, що необхідно на противагу збільшенню навантаження на вісь, а також потужності яка передається колісною парою на рейки, передбачити низку заходів, які могли б зменшувати знос бічної грані головки рейки та поверхні катання колісної пари.

До таких заходів можна віднести:

- зменшення сили тяги, що передається однією колісною парою. На електротяговому рухомому складі який експлуатується це можливо зробити тільки зменшенням ваги вантажного поїзду. При проектуванні процесу перевезень на залізницях потрібно це враховувати;

- зменшення відстані між внутрішніми поверхнями гребенів колісної пари в межах допусків;

- збільшення твердості поверхні рейки, але в зв'язку з можливими боковими підрізами гребенів в межах раціонального підняття співвідношення твердості колеса і рейки;

- нанесення на поверхню гребенів коліс змащувального матеріалу, що підвищує стійкість до зносу;

- можливо зменшення відсотку сили тяги, що передається через поверхню гребеня, шляхом зменшення сили тертя в контакті «рейка-гребінь», але це в свою чергу може знизити використання потужності локомотива. (Якщо нанести мастило на бічні поверхні гребенів, то сила тяги знижується на автотчепленні на 10-12%).

Використання кожного із заходів по зниженню зносу пари «рейка-колесо» в експлуатаційних умовах, що існують на залізницях залежить від:

1. Підбору раціональної твердості матеріалів із яких виготовляються рейки та бандажі колісних пар, також їх раціональних співвідношень;

2. В сучасних умовах універсальними заходами для всіх залізниць є: зміцнення робочої поверхні гребеня та зменшення його товщини;

3. Нанесення мастила в контакт «рейка-колесо» доповнюють вищезгадані заходи і його використовують в залежності від профілю ділянки залізниці. Ефективність нанесення мастила залежить від інтенсивності зносу гребеня, від зміцнення поверхні гребеня та зменшення його товщини. Це, як правило, не має сенсу на тих залізницях, де ресурс бандажа складає менше 700 тис. км пробігу. Але зміцнення поверхні бандажа, як уже згадувалось, вирішення проблеми не дасть.

Змащення гребенів, як описувалось вище, приводить до зниження сили тяги. Якщо уніфікована вага вантажних поїздів на дільницях обслуговування не значна, то змащування ще можливо використовувати. Але якщо уніфікована вага поїзда близька до максимальної що може зрушити локомотив, то зменшення коефіцієнту зчеплення коліс локомотива та рейок веде до буксування колісних пар, зниження швидкості до величини, нижче розрахункової, перевантаженню тягових двигунів і їх пошкодження.

Однією з проблем є відсутність досліджень впливу зміни профілю бандажа коліс тягового рухомого складу на взаємодію з колією та знос гребенів колісних пар. З моменту переходу на електротягу минуло багато часу, а таких досліджень не проводилось. Наприклад, на локомотивах які експлуатуються на

Львівській залізниці вже через 3500 тис. км, параметри профілю бандажа вже мають значні відхилення від початкового (значний підріз гребенів). Дані отримані із звіту про заміри параметрів бандажів колісних пар в експлуатації який подається до служби локомотивного господарства кожної залізниці України.

Виходячи з цього потрібно зробити висновок, що до зносу гребеня з 33 мм до 25 мм 90 % пробігу до наступної обточки бандаж колісної пари працює на профілі, що не відповідає початковому. Такий стан речей має дійсно велике значення у вирішенні питань динаміки, сил, що діють на різні системи робочих частин рухомого складу та колії.

Література

1. Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового складу залізниць України колії 1520 мм / ЦЗ/023. – ЗАТ «Мінетек». – К.: «НВП Поліграфсервіс», 2011. – 171 с.
2. Лашко А.Д. К вопросу о стратегии Укрзалізнички по решению проблемы устранения сверх нормативных износов пары «колесо-рельс» / А.Д. Лашко, О.М. Савчук // Залізничний транспорт України : наук.-практ. журнал. – 1997. – № 2-3. – С. 2-4.
3. Беседин И.С. Целевые задачи обеспечения устойчивости взаимодействия в системе колесо – рельс / И.С. Беседин // Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути : сб. докладов науч.-практ. конф. – М. : Щербинка, 2003. – С. 11-13.
4. Сергиенко Н.И. Некоторые пути снижения сверхнормативного износа колес тягового подвижного состава / Н.И. Сергиенко, Г.К. Гетьман // Залізничний транспорту України. – 1997. – № 2-3. – С. 15-17.
5. Косов В.С. Исследования взаимодействия в системе «колесо-рельс» / В.С. Косов, А.Л. Бидуля, В.В. Березин, А.А. Лунин // Путь и путевое хозяйство : науч.-поп. производ.-техн. журнал. – 2012. – № 9. – С. 12-15.
6. Богданов В.М. Современные проблемы системы колесо-рельс / В.М. Богданов, С.М. Захаров // Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути : сб. докладов науч.-практич. конф. – М. : Щербинка, 2003. – С. 11-13.
7. Косов В.С. Исследования взаимодействия в системе «колесо-рельс» / В.С. Косов, А.Л. Бидуля, В.В. Березин, А.А. Лунин // Путь и путевое хозяйство : науч.-поп. производ.-техн. журнал. – 2012. – № 9. – С. 12-15.
8. Даніленко Е.І. Про необхідність внесення змін в існуючі нормативні допуски по ширині рейкової колії у прямих та кривих при впровадженні швидкісного руху поїздів на залізницях України / Е.І. Даніленко, М.І. Карпов, В.М.Молчанов, Р.М.Йосифович // Залізничний транспорт України: наук.-практ. журнал. – 2014. – № 2. – С. 9-17.
9. Марков Д.П. Повышение твердости колес подвижного состава (предпосылки и перспективы) / Д.П. Марков // Вестник ВНИИЖТ. – М., 1995. – № 3. – С. 10-17.
10. Ларин Т.В. Износ и пути продления срока службы бандажей железнодорожных колес / Т.В. Ларин. – М.: Трансжелдориздат. –1958. –168 с.
11. У. Дж. Харрис. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Дж. Харрис и др. ; [перев. с англ. Захаров С.М.]. – М. : Интакст, 2002. – 408 с.
12. Иванов В.Н. Конструкция и динамика тепловозов : Учебник для вузов ж.-д. транспорта / В.Н. Иванов. – М.: Транспорт, 1974. – 335 с.
13. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.П. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983.
14. Деев В.В. Тяга поездов : Учебное пособие для вузов / Г.А. Ильин, Г.С. Афонин ; под ред. В.В. Деева. – М. : Транспорт, 1987. – 264 с.
15. Козырев А.И. Расчет напряженно-деформированного состояния колеса и рельса в зоне контакта / А.И. Козырев, А. Алижан // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 12. – С. 41-43.
16. Автоколебания и устойчивость движения рельсовых экипажей / Ю.В. Демин, Л.А. Длугач, М.Л. Коротенко, О.М. Маркова. – К. : Наукова думка, 1984. – 160 с.
17. Garg V.K. Dynamics of railway vehicle systems / V.K. Garg, R.V. Dukkipatti. – Academic Press. – 1984.