

**ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНІ, ДОРОЖНІ, БУДІВЕЛЬНІ,  
МЕЛІОРАТИВНІ МАШИНИ І ОБЛАДНАННЯ**

---

УДК 625.032

**АНАЛІЗ РОБІТ З КЕРУВАННЯ ТЕРТЯМ ТА ЗЧЕПЛЕННЯМ В  
КОНТАКТІ «КОЛЕСО-РЕЙКА»**

Канд. техн. наук С.В. Воронін, інж. С.С. Карпенко, О.В. Волков, К.О. Бакін

**АНАЛИЗ РАБОТ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТРЕНИЕМ И СЦЕПЛЕНИЕМ В  
КОНТАКТЕ «КОЛЕСО-РЕЛЬС»**

Канд. техн. наук С.В. Воронин, инж. С.С. Карпенко, А.В. Волков, К.О. Бакин

**ANALYSIS WORK MANAGEMENT AND CLUTCH FRICTION IN TOUCH  
"WHEEL-RAIL"**

Cand. of techn. sciences S.V. Voronin, eng. S.S. Karpenko, A.V. Volkov, K.O. Bakin

*Проведений аналітичний огляд досліджень з керування тертям та зчепленням в контактні "колесо-рейка" при русі рухомого складу. Визначені найбільш перспективні способи, в основу яких покладено принципи ресурсо та енергозбереження на залізничному транспорті.*

*Ключові слова:* рухомий склад, колесо, рейка, тертя, зношування, мастильний матеріал, електричне поле, магнітне поле.

*Проведен аналитический обзор исследований по управлению трением и сцеплением в контакте "колесо-рельс" при движении подвижного состава. Определены наиболее перспективные способы, в основу которых положены принципы ресурсо- и энергосбережения на железнодорожном транспорте.*

*Ключевые слова:* подвижной состав, колесо, рельс, трение, износ, смазывающий материал, электрическое поле, магнитное поле.

*Analytical review of studies with control friction and adhesion in touch "wheel-rail" the motion of rolling stock. Identified the most promising methods, based on the principles of resource and energy efficiency of the railways.*

*Keywords:* rolling stock, wheels, rack, friction, wear, lubricant, electric field, magnetic field.

**Вступ.** Дослідження та аналіз процесів у трибосистемі «колесо-рейка» є одним з першочергових питань, які розглядаються при проектуванні та вдосконаленні рухомого складу залізничного транспорту. Це пояснюється тим, що взаємодія колеса з рейкою є

фізичною основою руху рухомого складу і від параметрів взаємодії цієї системи залежать безпека руху залізничного транспорту та основні техніко-економічні показники рухомого складу й колійного господарства [1]. Важливість цього питання полягає ще й у тому, що воно має двояку

природу: з одного боку необхідно підтримувати на заданому рівні коефіцієнт зчеплення між колесами рухомого складу та рейками на поверхні катання, а з іншого боку виникає необхідність зменшення коефіцієнта тертя між гребенями коліс та боковими поверхнями рейок, особливо в кривих ділянках колії.

**Мета роботи** полягає у вивченні існуючих та визначенні найбільш перспективних способів зміни тертя та зчеплення в контакті “колесо-рейка”.

**Огляд робіт зі зниження тертя та зношування колеса і рейки в кривих ділянках колії.** При русі рухомого складу в прямих та кривих ділянках колії виникають найрізноманітніші поєднання вертикальних та горизонтальних сил, що діють в точці контакту системи «колесо-рейка» [2,3]. Найбільш несприятливі та небезпечні поєднання виникають при проходженні рухомим складом кривих ділянок колії, особливо малого радіусу. Це зумовлено тим, що при русі в кривих ділянках колії при деякому куті набігання колесо може контактувати з рейкою в двох різних точках – так званий “двоточковий” контакт. Виникнення “двоточкового” контакту призводить до того, що площадка контакту розділяється на дві частини, і в кожній з частин виникають підвищені контактні напруження. Цей фактор впливає на безпеку руху, якість перевезень та зниження техніко-економічних показників рухомого складу внаслідок підвищеного тертя і зношування.

Зниження безпеки руху зумовлюється тим, що внаслідок виникнення підвищених контактних напружень збільшуються горизонтальні сили, що діють на гребені коліс. Внаслідок цього різко підвищується знос гребенів, що сприяє зниженню плавності руху рухомого складу, розбиванню верхньої будови колії та підвищенню вірогідності викочування колеса на рейку за наявності великих сил тертя, що призводить до можливості сходу складу з колії. Також підвищення

горизонтальних сил веде до відтискання зовнішньої рейки, що призводить до розширення колії в деяких випадках понад нормовану величину.

Зниження техніко-економічних показників проявляється в тому, що при підвищенні контактних напружень різко збільшуються сили тертя між гребенями коліс та боковою поверхнею рейок, що призводить до їх швидкого зносу, як наслідок, частой заміни та ремонту деталей екіпажів рухомого складу та верхньої будови колії. Також підвищене тертя знижує силу тяги локомотивів, тобто призводить до недовикористання їх корисної потужності.

Аналіз існуючої літератури показав, що існує велика кількість рішень, направлених на дослідження і контроль процесу тертя і зносу колеса по рейці. Серед технічних рішень можна виділити декілька основних:

- конструктивні рішення [2, 4, 5];
- підбір контактуючих матеріалів та вдосконалення технологій поверхневої обробки [6];
- розробка технологій, технічних засобів і змащувальних матеріалів для лубрикації зони контакту гребеня колеса з рейкою [7].

До конструктивних рішень слід віднести методи вдосконалення візків, а саме радіальне устанавлення колісних пар і використання візків з вдосконаленим ресорним підвішуванням [2, 4]. Візки з радіальним устанавленням колісних пар забезпечують зниження проковзування коліс при проходженні кривих ділянок колії. Останні випробування візків з вдосконаленим ресорним підвішуванням показали значне зменшення поперечних сил при взаємодії коліс, рейок і їх зносу (майже на 50%), а також скорочення споживання палива (приблизно на 20%) в порівнянні із стандартними візками. В покращених візках застосовані діагональні зв'язки і додаткові зв'язки на рамі. Ще одним напрямком [5] є устанавлення на

## Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини і обладнання

вантажних вагонах бокових опор з постійним контактом для пом'якшення проблеми виляння – одного із основних факторів зносу конструктивних елементів візків та руйнування геометрії верхньої будови колії.

Для зниження зносу важливим моментом є підбір матеріалу для виготовлення рейок та коліс рухомого

складу. Сучасні рейки прокатуються лише із злиwkів сталі [6]. Сталь виготовляється в конверторах за способом Бессемера чи в мартенівських печах. Якість рейкової сталі визначається її хімічним складом, мікроструктурою та макроструктурою. Хімічний склад сталі вітчизняних рейок характеризується добавками до заліза, поданим в таблиці.

Таблиця

Хімічний склад рейкових сталей

Тип рейок	Марка сталі	Вміст елементів, %					
		вуглець	марганець	кремній	фосфор	сірка	миш'як
Р75 ГОСТ 16210-70	М-76	0,69-0,82	0,75-1,05	0,13-0,28	0,035	0,045	0,15
Р65							
Р50	М-75	0,67-0,80	0,75-1,05	0,13-0,28	0,035	0,045	0,15
Р43	М-71	0,64-0,77	0,60-0,90	0,13-0,28	0,40	0,050	Не нормовано

Вуглець підвищує твердість і зносостійкість рейкової сталі. За даними А.І. Скакова, зміна в мартенівській сталі кількості вуглецю з 0,42 до 0,62 % може збільшити її зносостійкість більше ніж в 7 разів, а збільшення з 0,63 до 0,7% – приблизно на 30%.

Марганець підвищує твердість і зносостійкість сталі, забезпечуючи їй достатню в'язкість.

Кремній покращує якість сталі, підвищуючи твердість і спроможність опиратися зносу.

Фосфор і сірка є шкідливими домішками, які надають сталі крихкості.

Миш'як декілька збільшує твердість і зносостійкість рейкової сталі, але в надлишковій кількості зменшує ударну в'язкість.

За мікроструктурою, встановленою під мікроскопом із збільшенням в 100 – 200 разів, компонентами звичайної рейкової сталі є ферит, який складається із вільного

від вуглецю заліза Fe, і перліт, який являє собою суміш фериту і цементиту Fe<sub>3</sub>C.

Вивчення мікроструктури рейкової сталі показує, що значний опір зносу і в'язкість забезпечує сорбітова структура. Для отримання сорбітової структури застосовують спеціальну термічну обробку сталі. В наш час найбільшого розповсюдження отримало поверхневе (на 8 – 10 мм) загартовування голівки рейки на сорбітову структуру.

Одним з перспективних напрямків, направлених на керування тертям та зношуванням в системі контакту колеса з рейкою, є оптимізація профілів колеса і рейки [4, 5].

Утворення оптимального профілю рейок і його збереження сприяють зниженню поперечних сил і напружень у взаємодії колеса з рейкою та послаблюють динамічний вплив рухомого складу на колію. Разом з тим виконані розрахунки за математичною моделлю і натурні експерименти показали, що шліфування

робочої викружки голівки зовнішньої рейки кривих створює умови для виникнення жорсткого двоточкового контакту “колесо-рейка”, знижує спроможність вагонних візків до самовстановлення і веде до перекосу візка.

Колеса, які мають значний знос по прокату, перешкоджають орієнтуванню візків у колії, викликають розпір колії, пошкодження внутрішньої рейки кривих і елементів стрілочних переводів. Такі колеса, а також колеса з витонченим гребенем в кривих зі зношеними рейками можуть викликати високі контактні напруження внаслідок неузгодження профілів колеса з рейкою. Колеса з дефектами на поверхні катання є причиною виникнення ударних навантажень, які також викликають пошкодження компонентів колії і рухомого складу.

Шліфування рейок [4] – найбільш розповсюджений спосіб підтримання рейок в працездатному стані. Воно дозволяє своєчасно усунути викривлення профілю, хвилеподібний знос і внутрішні дефекти (які знаходяться при використанні сучасних засобів ультразвукової дефектоскопії), а також покращити вписування рухомого складу в колію. Переваги шліфування виражаються в продовженні строку служби рейок.

Серед способів, які не відносяться до вдосконалення конструкції, найбільш перспективним є використання змащування [7]. Сьогодні використовуються три основних групи рейко- та гребенезмащувачів:

- форсунки для нанесення на гребені коліс рідких мастильних матеріалів;
- колійні лубрикатори – нанесення рідких або консистентних мастильних матеріалів на бокову поверхню рейок;
- тверді мастильні стержні.

Перелічені способи нанесення мастильного матеріалу можуть застосовуватися як окремо, так і у комплексі. Основною їх перевагою є можливість нанесення потрібної кількості мастильного матеріалу безпосередньо в

зону тертя. Це дозволяє, незалежно від конструкції контактуючих тіл, формувати на поверхнях тертя мастильний шар заданої товщини, тим самим змінювати коефіцієнт тертя в широкому діапазоні. Однак такі способи мають деякі недоліки. До недоліків першого способу змащування можна віднести:

- складну багатокомпонентну систему – бак, насос, форсунки, шланги (як наслідок, велика вірогідність виходу з ладу окремих компонентів);

- високі вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу і якості проведення робіт з ремонту та обслуговування системи;

- високу вірогідність попадання мастильного матеріалу на доріжку катання;

- високу залежність в'язкості мастильної речовини від температури навколишнього середовища;

- високу вартість.

Колійні лубрикатори мають такі недоліки:

- також складну багатокомпонентну систему і високі вимоги до кваліфікації персоналу;

- високу залежність в'язкості мастильної речовини від температури навколишнього середовища;

- обмеженість дії від місця установлення;

- високу вартість.

Тверді мастильні стержні також мають недоліки:

- низьку адгезію;

- потрапляння мастильної речовини на доріжку катання внаслідок викрашування;

- відсутність достатньої товщини нанесеного шару мастильної речовини;

- велике спрацьовування стержня незалежно від наявності контакту гребінь-рейка;

- високу вартість стержнів.

Незважаючи на перелічені недоліки, змащування поверхонь контакту «колесо-рейка» в кривих ділянках залишається

актуальним. Тут головними задачами є впровадження мастильних матеріалів нового покоління, наприклад, із застосуванням сучасних присадок або добавок (наночастинки вуглецю та ін.). Це дозволить максимально зменшити тертя та зношування, а також скоротити витрати мастильних матеріалів.

**Огляд робіт з керування зчепленням на поверхні катання колеса по рейці.** Суттєвий вклад в підвищення зчеплення вносить механічна складова сил тертя [10], яка виникає за рахунок механічного зачеплення мікронерівностей або за рахунок впровадження абразивних часток, наприклад піску. При цьому вважається, що робота сил тертя витрачається на знищення міжповерхневих зв'язків і деформування поверхневого шару. Хоча додавання піску є одним з дієвих способів підвищення тертя в зоні контакту, він одночасно є не бажаним через те, що пісок забруднює баласт, тим самим погіршуючи його дренажні якості, та руйнує поверхню катання коліс і рейок, що призводить до підвищення корозії і швидкого руйнування.

Однією з перспективних технологій підвищення зчеплення в парі тертя “колесо-рейка” є вплив на контакт електричного струму та магнітного поля [8]. Результати експериментальних досліджень, проведених Д.В. Ворбйовим показують, що на установці, виконаній за схемою “диск-площина”, яка імітує взаємодію колеса з рейкою, при вмиканні електричного струму і пропусканні його через контакт значно зростають сили зчеплення (коефіцієнт зчеплення зростає з 0,35 до 0,5). Суть досліджень полягала у пропусканні через контакт електричного струму 100...250 А та магнітного поля напруженістю до 7,5 КА/м.

Дія магнітного поля при відсутності вологого середовища і при його наявності не створює значного впливу на силу тертя (зростання сили тертя склало приблизно 10...20 %). При збільшенні напруженості

магнітного потоку, який характеризується силою струму в магнітній котушці, коефіцієнт тертя зростає. При зростанні струму від 10 А до 20 А коефіцієнт тертя зростає від 0,176 до 0,220.

Вплив електричного струму і магнітного поля на відміну від традиційного способу підвищення зчеплення шляхом застосування піску не призводить до пошкодження коліс і рейок, про що говорять показання профілограм, зняті з поверхонь тертя [8]. Спостерігається деяке покращення поверхні, зокрема зниження її шорсткості.

Аналогічним способом керування зчепленням може бути магнітно-імпульсна обробка поверхневих шарів колеса та рейки в процесі кочення. Згідно з роботою [9], обробка зразка сталі У8 імпульсним магнітним полем напруженістю 550 кЕ в поверхневому шарі сталі глибиною менше 400 мкм дає зростання мікротвердості до 30 % за рахунок теплового розігріву і з подальшим відновленням кристалічної решітки. Такі процеси, безумовно, приведуть до зміни параметрів зчеплення колеса із рейкою, які мають модифіковані поверхневі шари.

Наведені вище способи зміни параметрів зчеплення базуються на досить енергонасичених фізичних явищах, таких як електричний або магнітний розігрів поверхневих шарів металу.

В сучасних умовах, коли актуальною задачею є розробка енергозберігаючих технологій для транспорту, пошук нових ідей з керування зчепленням слід проводити на атомно-молекулярному рівні. Вперше такий підхід [10] був застосований професором Д.П. Марковим. Згідно з його роботами, процес зчеплення слід розглядати з позицій фононного тертя, коли контактуючі поверхні наближаються одна до одної на відстань, близьку до міжатомної відстані кристалічної решітки металу. В цьому випадку енергія іде не на створення і руйнування адгезійних зв'язків, а на збудження коливань атомів, які у

фізиці твердого тіла прийнято називати фононами.

Використовуючи уявлення про фононне тертя, можна припустити можливість зовнішнього впливу на сили електромагнітної взаємодії поверхневих атомів контактуючих тіл. При цьому незначна за енерговитратами зовнішня дія може призвести до суттєвої зміни сил взаємодії між контактуючими поверхнями, як наслідок – до суттєвої зміни зчеплення колеса із рейкою.

Розвиток вказаного напрямку потребує проведення спеціальних теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення впливу зовнішніх електричних та магнітних полів на сили фононного тертя.

#### **Висновки**

1. При запровадженні ресурсо- та енергозбереження в процесі руху рухомого

складу залізниць слід вирішувати дві головні задачі:

- мінімізувати тертя та зношування колеса та рейки в кривих ділянках колії;

- підтримувати на заданому рівні параметри зчеплення колеса із рейкою на поверхні катання.

2. Найбільш перспективним способом зменшення тертя та зношування коліс та рейок в кривих ділянках є використання змащування із застосуванням мастильних матеріалів нового покоління.

3. При вирішенні проблеми забезпечення надійного зчеплення коліс локомотивів із рейками слід враховувати фононний механізм тертя при зближенні контактуючих поверхонь до рівня атомарної шорсткості. Такий підхід до проблеми дозволить в найближчому майбутньому розробити енергозберігаючі технології керування тертям та зчепленням.

#### *Список використаних джерел*

1. Воробьев, А.А. Исследования напряженного состояния пятна контакта колеса и рельса [Электронный ресурс] / А.А. Воробьев, П.Г. Сорокин. – Режим доступа: [http://science-bsea.narod.ru/2004/mashin\\_2004/vorobiev\\_issled.htm](http://science-bsea.narod.ru/2004/mashin_2004/vorobiev_issled.htm).

2. Камаев, А.А. Взаимодействие локомотива и пути в кривых участках пути [Текст]: учеб. пособие / А.А. Камаев, Г.С. Михальченко. – Тула: Тульский политехнический институт, 1977. – 68 с.

3. Воробьев, А.А. К вопросу механики контактного взаимодействия колеса и рельса [Электронный ресурс] / А.А. Воробьев, Ю.В. Рязанов, П.М. Терехов. – Режим доступа: [http://www.science-bsea.bgita.ru/2010/mashin\\_2010/vorobev\\_vopros.htm](http://www.science-bsea.bgita.ru/2010/mashin_2010/vorobev_vopros.htm).

4. R. Sawley, R. Reiff. Railway Age, 1999, №6, p. 44, 46, 48, 49.

5. S. Kalay, J. Samuels. Railway Track & Structures, 2002, № 3, p. 13 – 16.

6. Амелин, С.В. Путь и путевое хозяйство [Текст] / С.В. Амелин, Л.М. Дановский; под ред. С.В. Амелина. – 3-е изд., перераб. – М.: Транспорт, 1972. – 216 с.

7. Лисіков, Є.М., Шляхи удосконалення стрілочних переводів залізниць України при використанні систем дозованого вводу мастильних матеріалів [Текст] / Є.М. Лисіков, В.М. Астахов, С.В. Ворнін, Ю.Л. Тулей // 36. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2010. – Вип. 24. – С. 5-10.

8. Воробьев, Д.В. Улучшение фрикционных характеристик пары трения колесо-рельс за счет воздействия на контакт электрического тока и магнитного поля [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Д.В. Воробьев. – Брянск, 2005. – 153 с.

9. Аліханов, С.Г., Фазові перетворення в поверхневому шарі металу при взаємодії сильного імпульсного магнітного поля [Текст] / С.Г. Аліханов, В.П. Бахтін, Н.А. Железнов, [та ін.] // Поверхня. Фізика, хімія, механіка. – 1986. – Вип. № 10. – С 144-146.

10. Марков, Д.П. Механизмы сцепления пары колесо-рельс с учетом фоновго трения [Текст] / Д.П. Марков // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. - №6. - С. 34-39.

Рецензент д-р техн. наук, професор М.П. Ремарчук

---

Воронін Сергій Володимирович, канд. техн. наук, доцент, завідуючий кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин.

Карпенко Сергій Степанович, головний інженер КП “Харківський метрополітен”.

Волков Олександр Вікторович, гр. 13-V-БКМм.

Бакін Кирило Олексійович, гр. МЗ-БКМ-Б-11.

Voronin S.V., cand. of techn. sciences.; Karpenko S.S., eng.; Volkov A.V., Bakin K.O.