

УДК 625.1.032.3.001.5:534.831

С.С. Гутиря, д-р техн. наук, проф., Одес. нац. політехн. ун-т,
С.М. Шапран, канд. техн. наук, доц.,
Е.Х. Тасанг, спеціаліст,
Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля, м. Луганськ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЧЕПЛЕННЯ КОЛЕСА З РЕЙКОЮ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

С.С. Гутиря, Е.Н. Шапран, Э.Х. Тасанг. Исследование сцепления колеса с рельсом методом акустической эмиссии. Методом акустической эмиссии исследован процесс формирования сцепления колеса с рельсом с учетом эксплуатационных загрязнений поверхностей контакта. Приведены числовые примеры.

S.S. Gutyrya, E.N. Shapran, E.H. Tasang. Investigation of adhesion of wheel with rail by acoustic emission method. By acoustic emission method the process of forming of wheel-rail adhesion is investigated taking into account the exploiting soiling of contact surfaces. Some data examples are presented.

Тенденція підвищення вагових норм потягів, подальший розвиток високошвидкісного пасажирського руху вимагають технічної досконалості локомотивів і покращення їх тягово-зчепних властивостей, що невід'ємно пов'язано з дослідженнями взаємодії колеса з рейкою і супутних явищ [1, 2]. Особливої уваги заслуговує дана проблема також через те, що вона визначає не тільки техніко-експлуатаційні показники залізничного транспорту, але і безпеку руху потягів.

Найбільш уживаною розрахунковою моделлю є модель контакту колеса з рейкою у вигляді багатогранника, що перекочується по площині [2]. Однак при цьому не враховується, що на гострому ребрі багатогранника напруження перевищують межу плинності, тобто його вершини вже при першому навантаженні деформуються пластично. При повторних навантаженнях силою, що не перевершує початковий рівень, пластичний контакт вироджується у пружний, але за умов зношування, корозії і мікроушкоджень рейки та колеса рельєф поверхонь контакту перманентно оновлюється, що і є причиною крипу. Якби деформації мікроставів були винятково пружними (пружний крип), то "псевдоковзання" було б настільки малим, що його не можна було б зафіксувати не тільки на колесах, але й у лабораторному експерименті.

Багато вчених вважають, що гіпотеза, яка пояснює виникнення сил тертя і крипу при коченні колеса по рейці як результат пластичного змінання нерівностей, є більш обґрунтованою [3, 4]. При дослідженні зміни коефіцієнту тертя f за схемою кочення з подовжнім ковзанням U для двох роликів з колісно-рейкових сталей встановлено, що експериментальна крива $f(U)$ значно відрізняється від теоретичної моделі, запропонованої Ф. Картером [5, 6]. Максимальне значення $f_{\max} = 0,6$ досягається не при $U = 0,6\%$, а при $U = 3,5\%$, тобто за умов відносного ковзання в 6 разів більшого за величиною, ніж це впливає з моделі пружного крипу. При такому ковзанні переміщення у зоні контакту не можуть бути винятково пружними, а матеріал має отримати пластичні деформації.

Завдяки сучасним дослідженням даної проблеми накопичено значний обсяг теоретичних та експериментальних результатів. Так, наприклад, висунуто гіпотезу про те, що пластичні деформації в зоні контакту колеса з рейкою починаються вже при ковзанні $U = 0,018\%$, тобто має місце не пружний, а пластичний крип [5]. З цим висновком узгоджуються дані експериментів, в яких встановлено, що навіть при нульовому прослизанні спостерігається пластична деформація поверхневих шарів колісно-рейкових зразків [7]. В теоретичних дослідженнях встановлено, що зародження пластичних деформацій відбувається при тисках у центрі площинки контакту p_0 вище за значення $2,76 \cdot \tau$ (τ — граничне дотичне напруження), що є цілком імовірним з врахуванням реальних умов експлуатації колісної пари [8].

При побудові теоретичних моделей процесу зчеплення використовують сучасні досягнення в трибології і розглядають контакт шорсткої поверхні жорсткого тіла з гладкою поверхнею більш м'якого контртіла [3, 4]. На основі сферичної моделі шорсткої поверхні колеса, з урахуванням розподілу мікронерівностей за комплексним критерієм шорсткості Δ , запропоновано розрізнати певні види контакту (див. таблицю).

Класифікація видів контакту колеса з рейкою

Вид контакту	Критеріальна умова
Пружний ненасичений	$0 < \frac{p_c(1-\mu^2)}{E} \leq 6 \cdot 10^{-2} \Delta^{1/2}$
Пружний насичений	$6 \cdot 10^{-2} \Delta^{1/2} < \frac{p_c(1-\mu^2)}{E}$
Пружно-пластичний	$\frac{14,5}{\Delta^2} \left[\frac{HB(1-\mu^2)}{E} \right] < p_c / HB < 0,0625$

В таблиці встановлено такі позначення: p_c — контурний тиск (середнє нормальне напруження на контурній площинці контакту); $\Delta = R_{\max} / (r \cdot b^{1/\nu}) = 0,01 \dots 0,1$ — комплексний критерій шорсткості поверхонь контакту; b і ν — параметри степеневої апроксимації кривої опорної поверхні; R_{\max} — максимальна висота мікронерівностей; r — радіус заокруглення вершин мікронерівностей; E — модуль пружності Юнга; μ — коефіцієнт Пуассона; HB — твердість за Брінелем.

У відповідності з теоретичною моделлю пружно-пластичного контакту, починаючи з контурних тисків, що перевершують величину $p_c \approx \frac{5,4}{\Delta^2} \cdot \frac{HB^5(1-\mu^2)^4}{E^4}$, у контакті колеса з рейкою мають відбуватися водночас пружні та пластичні деформації [3].

Процеси, що швидко протікають при терті шорстких тіл, носять стохастичний характер, тому що пов'язані з пружними і пластичними деформаціями вершин мікронерівностей, утворенням мікротріщин, руйнуванням і відновленням дійсних ділянок контакту і тонких плівок. Такі процеси викликають хвилі акустичної емісії (АЕ) і тому запропоновано застосувати для досліджень метод оцінки характеру деформацій у зоні контакту шляхом виміру параметрів акустичних сигналів, що генеруються у процесі силової взаємодії колеса з рейкою. Необхідно відзначити, що при пластичній деформації більшості металів в області межі текучості генеруються пружні хвилі частотою від 150 до 1500 кГц навіть при відносно невеликих швидкостях руху дислокацій, повороті вузлів кристалічних решіток або рості мікротріщин [9]. Тому при встановленні виду контакту і дослідженні напруженого стану можна виходити з того, що за умов виключно пружних деформацій сигналів акустичної емісії не буде.

Для одержання найбільш повної інформації про закономірності деформації кристалічних матеріалів реєстрованими параметрами експерименту було обрано амплітудний спектр і інтенсивність \dot{N} акустичної емісії. Апаратуру було встановлено на дослідному стенді з натурними зразками колеса і рейки (рис. 1). Хвилі напружень, що виникали у зоні контакту, перетворювалися п'єзодатчиком в електричні сигнали, які після передпідсилювача фільтрувалися і надходили на цифровий запам'ятовуючий осцилограф АСК 3151 для попереднього накопичування й обробки інформації, а далі надходили до ЕОМ для візуального спостереження,

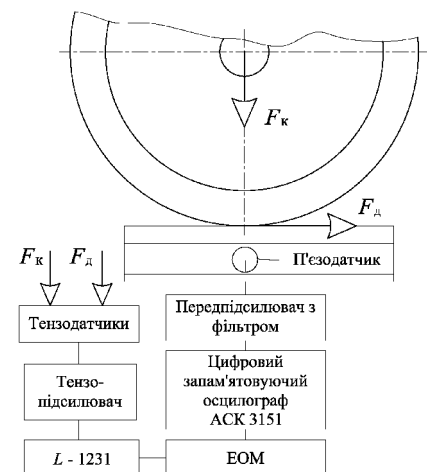


Рис. 1. Блок-схема стендового обладнання для дослідження деформацій у контакті колеса з рейкою методом АЕ

реєстрації та дослідження. Завдяки застосуванню статистичного методу випадкової вибірки можна було вимірювати сигнали повторюваної форми з періодом 200 пс, що відповідає швидкості 5 млрд. вибірок за секунду. Для виключення впливу на результати виміру процесів руйнування часток кварцового піску й інших збурень у передпідсилювач встановлено смуговий фільтр, частотний діапазон якого 210 ± 10 кГц був обраний виходячи з аналізу спектральних щільностей сигналів АЕ за інтенсивністю, частотою й амплітудою для матеріалів колеса, рейки та піску (рис. 2).

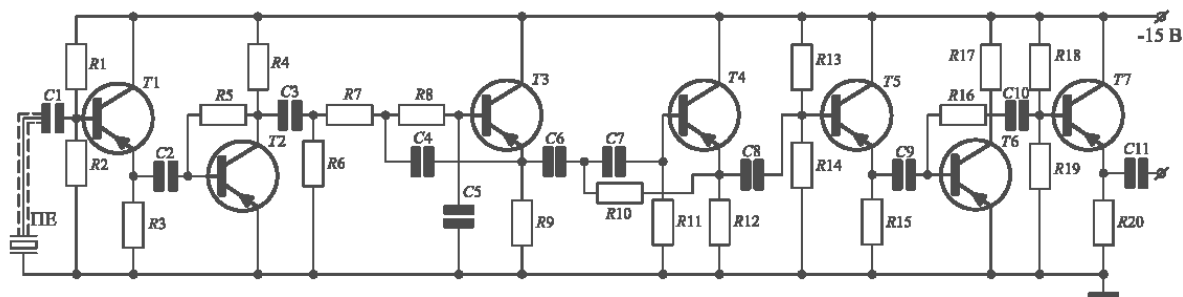


Рис. 2. Принципова схема передпідсилювача з фільтром: ПЕ — п'єзоелемент ЦСТ 23

Дослідження починалось з вивчення впливу на зчепні характеристики одного з істотних для деформацій в контактні колеса з рейкою факторів — навантаження на вісь F_k і відповідного контурного тиску p_c . При проведенні експерименту було враховано той факт, що сила тертя спокою $F_0 = f_0 \cdot F_k$ найбільш просто визначається при нерухомому колесі в момент перевищення її дотичною силою F_d , що діє на контакт (рис. 3). Після зриву зчеплення напруга живлення тягового електродвигуна відключалася, колесо переміщували на інше місце і дослід повторювався ще 20...30 разів. Для вимірів дотичної сили F_d і навантаження на вісь F_k застосовано схему, що включає тензодатчики, підсилювач постійного струму і відповідний цифровий тензоміст L-1231 (див. рисунок 1).

Для досягнення цілей дослідження особливий інтерес мають виміри інтенсивності АЕ при відсутності забруднень і невеликому рівні навантаження на вісь $F_k = 5$ кН (див. рисунок 3, а). Для порівняння такі ж виміри проведено при номінальному рівні навантаження $F_k = 115$ кН (див. рисунок 3, б).

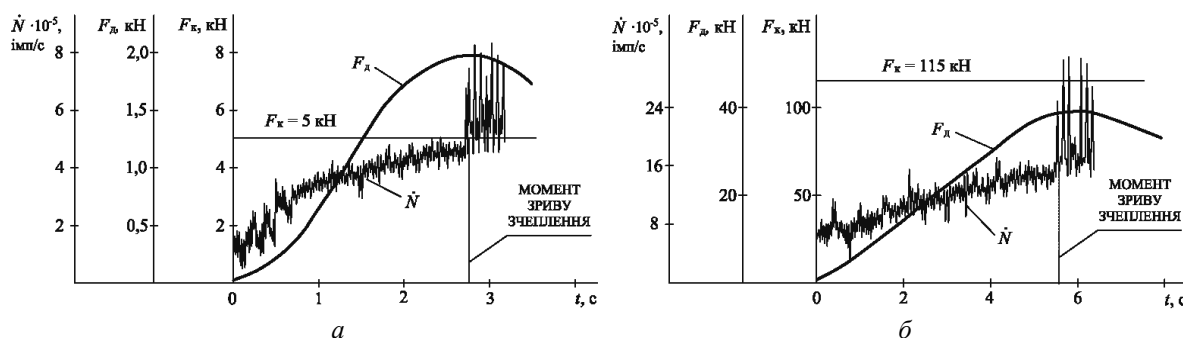


Рис. 3. Графіки зміни в часі інтенсивності \dot{N} акустичної емісії за умов різного навантаження на вісь, відсутності забруднень рейки і плавній зміні дотичної сили до моменту зриву зчеплення колеса при $F_k = 5$ кН (а) і 115 кН (б)

Також досліджено вплив фізико-хімічного стану контактуючих поверхонь на зчепні властивості колеса з рейкою. Виміри виконувалися за описаною методикою, але при істотних відмінностях у стані поверхонь контакту: знежирена суха рейка, замаслена, волога, а також досліджено вплив піску в означених умовах (рис. 4). При цьому інтенсивність акустичної емісії \dot{N} і

коефіцієнт тертя спокою $f_0 = F_0/F_k$ вимірювалися тільки перед моментом зриву зчеплення колеса з рейкою.

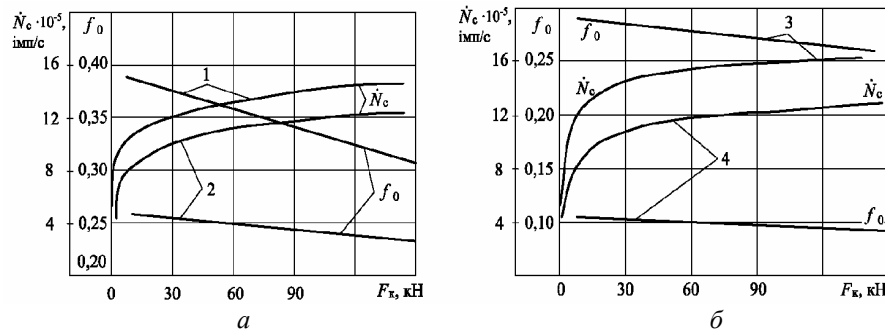


Рис. 4. Графіки зміни середньої інтенсивності акустичної емісії \dot{N} і коефіцієнту тертя спокою f_0 від навантаження на вісь F_k при різних станах поверхні рейки: крива 1 — рейка знежирена суха; 2 — рейка волога (а); крива 3 — волога рейка забруднена піском; 4 — рейка забруднена мастилом (б)

За результатами проведених досліджень зроблено такі висновки:

— зростання інтенсивності АЕ при незначному навантаженні на вісь (див. рис. 4, а) свідчить про розвиток пластичних деформацій мікронерівностей у контакті задовго до досягнення середнім напруженням межі текучості, що добре узгоджується з дослідженнями [5, 7];

— різке зростання інтенсивності АЕ перед зривом зчеплення колеса (див. рисунок 3) можна пояснити збільшенням кількості мікронерівностей, що деформуються, в одиницю часу та утворенням на них мікротріщин при прослизанні колеса щодо рейки;

— зміна дотичної сили від нуля до моменту зриву зчеплення колеса з рейкою при малих навантаженнях на вісь (див. рисунок 3, а) викликає підвищення максимального рівня інтенсивності АЕ в середньому до чотирьох раз

$$\frac{\dot{N}(F_d = 0)}{\dot{N}(F_d = 1,9 \text{ кН})} \approx 4,$$

а при великих навантаженнях (див. рисунок 3, б) — тільки в 2 рази

$$\frac{\dot{N}(F_d = 0)}{\dot{N}(F_d = 37 \text{ кН})} \approx 2;$$

— за наявності в зоні контакту води або масляних забруднень зберігається закономірність зниження коефіцієнту тертя спокою з ростом навантаження на вісь (див. рисунок 4), а також закономірність зміни інтенсивності АЕ, яка знижується в середньому на 15...20 % у порівнянні з даними для сухої рейки (див. рисунок 3), тобто, незважаючи на забруднення поверхонь, має місце ефект взаємного проникнення мікронерівностей водночас з розвитком їхніх пластичних деформацій;

— наявність піску в зоні контакту при знежиреній сухій рейці практично не змінює інтенсивність АЕ (див. рисунки 3, б та 4, б при $F_k = 115 \text{ кН}$);

— за наявності на поверхні рейки води, подача піску викликає збільшення інтенсивності АЕ в середньому на 20...25 %, аналогічні результати отримано при мастильних забрудненнях (див. рисунок 4).

Отже, характер силової взаємодії колеса і рейки за наявності в контакті абразивних часток і мастильних забруднень є якісно подібним до процесів, що відбуваються при чистій рейці. Імовірно за все, пружно-пластичне деформування мікронерівностей здійснюється поверхнями металу, на яких закріплюються тверді частки кварцового піску, причому кількість взаємодіючих мікронерівностей залишається практично незмінною. Однак при значній величині забрудненої поверхні рейки істотно знижується коефіцієнт тертя спокою і рівень інтенсивності АЕ. Імовірно, що в цьому випадку середній діаметр абразивних часток є меншим за товщину

шару забруднень, що знижує можливість їхнього закріплення на контактуючих поверхнях. Необхідно відзначити, що в усіх експериментах спостерігався ефект росту АЕ при незначних навантаженнях на вісь, а також стабілізація її інтенсивності при навантаженнях, близьких до номінальних, що вказує на істотну зміну межі плинності металу в точці контакту через взаємний вплив деформацій мікронерівностей, так звану інтерференцію деформацій [8].

Підтверджено ефективність експериментальних досліджень методом акустичної емісії динамічних процесів взаємодії колеса з рейкою. Отримані в роботі дані вказують на те, що функціональне відображення кривої крипу, яке використовують у сучасних інженерних розрахунках, потребує уточнення. З огляду на фундаментальне значення цієї функції для вирішення сучасних наукових і практичних задач проблеми взаємодії рухомого складу і колії [1, 2] необхідно провести цільові дослідження взаємозв'язку коефіцієнту тертя в навантаженому контакті з фізико-механічними і хімічними параметрами процесів прослизання і зношування.

Література

1. Gutyrya S. Calculo del Eje de las Ruedas del Vagon Atraves de Metodos Probabilisticos / S. Gutyrya, V. Filipov, C.Q. Librado, R.G. Guardo // *Construccion de Maquinaria*. — Santa Clara (Cuba): UCLV, 1990. — № 1. — P. 78 — 91.
2. Коган А.Я. Взаимодействие колеса и рельса при качении // *Вест. ВНИИЖТ*. — М., 2004. — Вып. 5. — С. 33 — 40.
3. Крагельский И.В. Узлы трения машин: Справ. / Крагельский И.В., Михин Н.М. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.
4. Tadao Ohyama. Tribological Studies on Adhesion Phenomena between Wheel and Rail at High Speeds // *Wear*. — N.-Y., 1991. — Vol. 144. — P. 263 — 275.
5. Марков Д.П. Взаимосвязь коэффициента трения с проскальзыванием в условиях взаимодействия колеса с рельсом // *Вест. ВНИИЖТ*. — М., 2003. — Вып. 3. — С. 31 — 33.
6. Carter F.W. On the Action of a Locomotive Driving Wheel // *Proc. R. Soc.* — London, 1926. — Vol. 112A. — P. 151 — 157.
7. Ларин Т.В. Износ и пути продления срока службы бандажей железнодорожных колес // *Труды ВНИИЖТ*. — М., 1958. — Вып. 165. — 168 с.
8. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. — М.: Мир, 1970. — 359 с.
9. Грешников В.А. Акустическая эмиссия / Грешников В.А., Дробот Ю.В. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 272 с.

Надійшла до редакції 25 квітня 2006 р.