

11.2 Триботехнічна властивість профілю шорсткості при деформуванні нерівностей у системі "колесо-рейка"

Збільшення обсягу перевезень вантажів на залізниці й підвищення маси вантажних вагонів, безперебійне виконання щільного графіка руху зажадали пошуку шляхів максимального використання тягових властивостей локомотивів при русі потягів з місця й при їхньому русі на найбільш важких ділянках шляху. У зв'язку із цим виникає потреба в технічно досяжнім поліпшенні коефіцієнта зчеплення коліс із рейками. Класичний підхід ґрунтується на вивченні механічної моделі контактної взаємодії при коченні твердих тіл із гладкими поверхнями. Розглянутий підхід не враховує вплив рідких і дисперсних середовищ, що перебувають у зоні торкання коліс із рейками. У цей час стійке зчеплення коліс локомотива з рейками забезпечується за рахунок застосування піску. Відомо, що його використання як середовища для підвищення зчеплення приводить до зростання швидкості абразивного зношування й іншим ушкодженням робочих поверхонь колеса й рейки внаслідок дроблення часток піску, забруднення верхньої будови колії, що приводить до зниження загальної надійності елементів рухомого складу.

Одним з можливих шляхів підвищення величини й стабільності коефіцієнта зчеплення колеса з рейкою, є введення в зону фрикційного контакту спеціального фрикційного змащення (або модифікатора тертя), здатного при збереженні досить високого значення коефіцієнта зчеплення зменшити пошкоджуваність коліс і рейок. Кочення колеса по рейці із проковзуванням (від 0 до 100 %) викликає в основному два процеси руйнування: об'ємну пластичну деформацію (зняття) і абразивне зношування. Об'ємна пластична деформація нерівномірна по глибині від поверхні катання, досягає найбільших величин безпосередньо в поверхні й зменшується в міру видалення від неї. Тиск у контакті «колесо-рейка» у реальних умовах експлуатації змінюється від $1,7\text{ s}$ (s - границя текучості колісної й рейкової сталі) до 3 s і більш. Результатом пластичної деформації є плин металу із зони гребеня на поверхню кочення й на вершину гребеня. У ході пластичної деформації починають протікати процеси

стирання, що включають у себе: мікрозріз, схоплювання, утворення втомленісних тріщин тощо. Зменшення впливу пластичної деформації на процеси стирання в умовах експлуатації можливо за рахунок регулювання властивостей мікроструктури колісної й рейкової сталі, яке можна здійснити за рахунок термічної обробки сталі. Таким чином, на найважливішу механічну характеристику колісних і рейкових сталей, що відповідають не тільки за міцнісними властивості, але й триботехнічні – співвідношення значень твердості в системі « колесо-рейка». Для передачі крутного моменту й забезпечення зчеплення колеса з рейкою необхідне впровадження колеса в опорну поверхню рейки. При цьому, для забезпечення протікання нормального зношування в системі «колесо-рейка» із проковзуванням до 10 %, співвідношення твердостей повинне становити як мінімум 1,2:1, тобто при твердості колеса на 20 % перевищуючої твердість рейки. Однак з переходом наприкінці 50-х років на об'ємно-загартовані рейки, співвідношення в парі « колесо-рейка» було порушено й становить сьогодні 1:1,4, що приводить до погіршення зчеплення, збільшує проковзування й викликає інтенсивне зношування колісних пар. На основі аналізу світового досвіду й експериментальних робіт можна зробити висновок: збільшення твердості колеса на 1 НВ в експлуатаційному інтервалі твердостей збільшує їхню зносостійкість на 1-2 %. Крім того, збільшення твердості коліс від 250 до 600 НВ практично не впливає на зношування й контактну довговічність рейки, а довговічність коліс зростає пропорційно квадрату збільшення їх твердості.

Поверхневий шар у трибосистемі «колесо-рейка» у реальних умовах експлуатації, особливо гребені й бічні поверхні рейки, упрочнюється. Причому, глибина фрикційного шару досягає 0,01-0,03 мм, а збільшення твердості на поверхні - від 220 до 1200 HV_{0,1} (нижній індекс – навантаження на индентор, кгс). Механізм зміцнення фрикційного шару більш складний, чим просто його наклеп або загартування з фазовими перетвореннями, хоча високі контактні навантаження до 1000-1500 МПа й високі температури до 1000°C існують у малих обсягах фактичного контакту «колесо-рейка». Однак вони існують

протягом тисячних часток секунди. Тому вірніше говорити не про нагрівання або наклеп поверхневого шару, а про його високу енергонасиченість. При такій щільності енергії метал у шарі тече аморфно, як рідке скло. Цей механізм деформування, на думку, можна визначити як бездифузійне недислокаційне високоенергетичне аморфне зрушення. Після виходу із зони тертя метал у смугі ковзання миттєво проохолоджується, зберігаючи при цьому аморфну структуру металевих скла із твердістю 800 HV і більш. Таким чином, з короткого аналізу видно, що підвищення зносотійкості пари тертя « колесо-рейка » - складний багатофакторний процес, що вимагає комплексного підходу. У той же час, першим і природним кроком до розв'язку цієї проблеми є дослідження їх контактної взаємодії. Дослідження в області контактної взаємодії, вивчення фізико-хімічних і фрикційних характеристик поверхневих шарів системи "колесо-рейка", а також розробка методів підвищення величини й стабільності коефіцієнта зчеплення в цьому зв'язку представляються актуальними й перспективними. Мало вивченими є питання, пов'язані із впливом зовнішніх фізичних полів, вплив мікронерівностей на триботехнічні характеристики пар тертя. Для задач триботехніки використання методів математичного моделювання при правильному та об'єктивному підході до узагальнення результатів з оцінкою їх достовірності та точності дозволяють значно прискорити впровадження нових технічних рішень і скоротити трудові витрати та витрати дефіцитних матеріалів. З різноманітних вузлів триботехнічного призначення, які використовують у загальному машинобудуванні, найбільш масовими та відповідальними є вузли ковзання, вони ж і узагальнюють поняття трибологічних спряжень взагалі. Аналіз інформації, присвяченої моделюванню, показав, що створення розрахунково-експериментальних методів визначення триботехнічних характеристик спряжень стало назрілою необхідністю. Первинною проблемою при вивченні тертя є контактування дотичних поверхонь. У поняття контактування входить взаємодія поверхонь, що належать твердим тілам, під дією відносного зсуву й стискаючих сил з урахуванням їх відхилення від ідеальної форми й впливу середовища (гази й мастильні

матеріали), що є у зоні контакту. Оскільки поверхні деталей мають шорсткість і хвилястість, що обумовлені технологічною обробкою, а також тертям і зношуванням, то контакт деталей, що сполучаються, є дискретним і площа торкання становить незначну частину від номінальної площі. Усі реальні деталі мають контакт поверхонь на площі, яка становить усього 5-10% і лише іноді доходить до 25% від номінальної. Подальший розвиток теорії контактної взаємодії поверхонь тертя дозволить управляти процесами фрикційної взаємодії деталей стосовно до конкретних умов їх роботи, передбачити величину зношування, а також підвищити їхню зносостійкість. Внесок у вивчення структури й властивостей поверхневих шарів і побудови моделей фрикційного контакту внесли роботи Л.М. Рибаквої [599], Д. Ригни [600], В.І. Владимірова [601] і ін. В останні роки активно розвивається підхід до дослідження деформаційних процесів у поверхневих шарах, заснований на концепції структурних рівнів деформації й руйнування твердих тіл академіка В.Е. Паніна [602], а також на розумінні в рамках цієї концепції особливої ролі поверхні й поверхневих шарів у зародженні й розвитку пластичної деформації.

Незважаючи на постійний розвиток експериментальних методів матеріалознавства, зона тертя й особливо зона фактичного контакту залишаються важкодоступними для дослідження безпосередньо в процесі випробування. Звичайно інформація, одержувана під час експерименту, обмежується величиною коефіцієнта тертя, температурою на деякій відстані від поверхні й іноді на самій поверхні. При деяких видах випробувань на тертя можна також вимірювати лінійне зношування по зміні розміру зразка. Усі інші дані - про структурний і фазовий склад, зміну фізико-механічних властивостей матеріалу, ступені деформації, хімічних перетвореннях приповерхніх шарів, явищах переносу й механічного перемішування, як правило, можуть бути отримані тільки після завершення експерименту або в який-небудь проміжний момент після зупинки випробування. У цьому випадку дослідник спостерігає лише наслідки явищ і процесів, що протікали в трибосистемі. Крім того, деякі процеси, які йдуть безпосередньо в момент випробування й для протікання яких

необхідна висока температура, більші напруження й деформації можуть взагалі залишитися непоміченими, тому що в момент спостереження відсутні умови для їхнього протікання. І, навпаки, у ряді випадків після закінчення експерименту в трибосопряженні виявляються зміни, які відбулися не в процесі самого випробування, а з'явилися лише наслідком його припинення. Очевидним виходом з описаної ситуації може стати комп'ютерне моделювання процесів тертя й зношування. Результати, отримані в процесі чисельного аналізу, можуть скласти основу прогнозування поведінки матеріалів при контактних взаємодіях і забезпечити надалі вдосконалювання триботехнічних матеріалів. Можна зробити висновок, що при дослідженні пружного контактування трибоспряжень необхідно мати чітке уявлення про геометрію кривих, що мають місце у цьому процесі. У даній роботі є викладення матеріалу з розроблення методики задавання геометрії трибоспряження при числовому дослідженні його напружено-деформованого стану з урахуванням зміни геометрії за рахунок пластичного деформування нерівностей при обробці.

Напружений стан у зоні фактичного торкання тіл характеризується деформацією мікронерівностей поверхонь, а також пружними або пластичними деформаціями. Таким чином, поверхневий шар можна розглядати як деформівне, геометрично нелінійне тверде тіло [603]. При оцінці взаємодії контактуючих твердих тіл мікронерівності реальної поверхні моделюють у вигляді однакового розміру тіл правильної геометричної форми, що розташовані на деякій основі й розподілені за певною залежністю по висоті. При аналізі кривої опорної поверхні, як правило, не враховують процесів деформування мікронерівностей [603]. Однак насправді їх величина в процесі багаторазових контактних взаємодій може значно відрізнятись від їхніх вихідних значень. Виходячи із цього впливає завдання розрахунків зміни вихідних параметрів шорсткості контактуючих поверхонь після додавання навантаження. Однак їх аналіз при зміні фізико-геометричних параметрів трибоспряження викликає значні труднощі обчислювального характеру. Це спонукає до створення сучасних методів числового аналізу поверхонь тертя,

що дозволять алгоритмічно визначати необхідні параметри напружено-деформованого стану поверхонь тертя в залежності, зокрема, і від параметрів шорсткості.

Розглянемо визначення параметрів шорсткості при контактуванні робочих поверхонь. Нехай висотні характеристики взаємодіючої поверхні настільки малі, що ними можна зневажити [604]. У цьому випадку сформовану поверхню можна розглядати як поверхню з масляними кишнями, сформовану методом пластичного деформування при зміцнювальній обробці, а параметрами шорсткості між масляними кишнями зневажити [601]. Позначимо величини шорсткості, прийняті за ГОСТ 2789-73 для вихідної шорсткості опорної поверхні $R_a, R_p, R_z, R_{\max}, S_m, t_p$; поверхні взаємодії $R_{a1}, R_{p1}, R_{z1}, R_{\max1}, S_{m1}, t_{p1}$; знову сформованого профілю $R_a^f, R_p^f, R_z^f, R_{\max}^f, S_m^f, t_p^f$. Виділимо елементарну поверхню, що має ширину, що дорівнює кроку поздовжньої, а довжину - кроку поперечної шорсткості

$$S_m^{\text{поз}} = \frac{l_{\text{поз}}}{n_{\text{поз}}}, \quad S_m^{\text{поп}} = \frac{l_{\text{поп}}}{n_{\text{поп}}} \quad (1)$$

де $l_{\text{поз}}, l_{\text{поп}}$ - базова довжина, відповідно, у поздовжньому й поперечному напрямках; $n_{\text{поз}}, n_{\text{поп}}$ - кількість виступів, відповідно, у поздовжньому й поперечному напрямках. Обсяг масляних кишень займаної поверхні рівний [604]

$$V_{\text{м.к.}} = A_H R_p^f \left(\frac{t_0}{100} \right), \quad (2)$$

де A_H - номінальна площа поверхні без урахування масляних кишень; t_0 - відносна площа, що займана масляними кишнями при зміцнювальній обробці, визначеною з рівняння [604]

$$t_0 = 50 \left(\frac{R_{\max} - Y}{R_{\max} - R_p} \right)^{\left(5 - \frac{R_p}{R_a} \right)}, \quad (3)$$

де Y - відстань від лінії виступів до розглянутого профілю.

Вихідна шорсткість найбільш близько моделюється у вигляді еліптичного параболоїда, обсяг якого рівний

$$V_1 = 0,5 \pi a c R_{\max} . \quad (4)$$

Вважаючи, що в результаті деформації взаємодіяв увесь елементарний об'єм, можна записати рівняння для визначення об'єму западини

$$V_{zan} = V_2 - V_1 - V_3, \quad V_2 = 4ac(R_{\max} - Y), \quad V_3 = \frac{V_H \int_0^Y F(h) dh}{V_1} . \quad (5)$$

Максимальна величина знову сформованого профілю рівна

$$R_{\max}^f = R_{\max} - Y . \quad (6)$$

Величини R_a^f і R_z^f з достатньою точністю можна визначити із співвідношень [604]:

$$R_a^f = 0,2 R_{\max}, \quad R_z^f = 0,87 R_{\max} . \quad (7)$$

Відносну довжину опорної лінії профілю шорсткості на будь-якому рівні визначають залежністю [601]:

$$t_p^f = 100 - 45 \left(\frac{R_{\max}^f - Y}{R_{\max}^f - R_p^f} \right)^{\left(4,5 - 0,9 \frac{R_p^f}{R_a^f} \right)} . \quad (8)$$

Зміна кроку відбувається за рахунок того, що при формуванні нового профілю змінюється положення рівня середньої лінії. Цей рівень можна провести на вихідному профілі, відступивши від вершини максимально виступаючої нерівності на величину

$$e^f = R_{\max} - Y - R_p^f . \quad (9)$$

Враховуючи, що в еліптичному параболоїді параметри S_m^f і a^f рівні, величина t_p прийме значення

$$t_p = 100 - t_m \left(\frac{R_{\max} - Y - R_p^f}{R_{\max} - R_p} \right)^{\frac{50R_z - t_m R_a}{50R_a}}. \quad (10)$$

Після виконання перетворень можна одержати вираження для визначення середнього кроку нерівностей знову сформованого профілю

$$S_m^f = 2S_m \frac{t_m}{t_m^f} \left[1 - \frac{t_m}{100} \left(\frac{R_{\max} - Y - R_p^f}{R_{\max} - R_p} \right)^{\frac{50R_z - t_m R_a}{50R_a}} \right]. \quad (12)$$

Таким чином, використовуючи отримані залежності, на підставі розрахункових значень пластичних деформацій, обумовлених з теорії контактної взаємодії, з'являється можливість прогнозування параметрів шорсткості після одного або декількох навантажень. На відміну від змодельованого об'єму при стиску реальної шорсткості в початковий період не відбувається пластичного деформування основного матеріалу, а після настання насичення відсутнє деформування шорсткості й відбувається деформування лише основного матеріалу.

Для числової реалізації запропонованого аналізу шорсткості поверхонь тертя використовується алгоритм, що описаний в [605]. За цим алгоритмом можливий розв'язок великої різноманітності трибологічних задач, які можуть описувати нелінійне просторове деформування пружного твердого тіла, визначати втрату стійкості фізичного процесу, будувати рівноважні стани після бифуркаційної втрати стійкості. При цьому може бути прикладений довільний вектор статичних або квазістатичних зосереджених, розподілених або моментних навантажень, які як завгодно можуть бути розташовані постійно або дискретно в площині або в просторі. Крім того, дія цих сил може

бути прикладена або знята в процесі деформування. У якості результату можуть бути отримані характеристики напружено-деформованого стану мікронерівностей, їх вплив на процес тертя й зношування об'єкта. Геометрична форма контактуючих поверхонь може бути задана або аналітично, або за допомогою чисельної функції, яка визначається обчислювальними методами.

Докладно метод описано в [605]. Коротко про запропонований метод. Математична модель базується на відомих підходах Лагранжа й Ейлера, які описують рівновагу й пружне деформування елемента, його зовнішню й внутрішню геометрію. На підставі цих передумов сформована система розв'язальних рівнянь 18 порядку, які в загальному випадку є нелінійними і описують просторове деформування елемента. Методика чисельного розв'язку системи рівнянь заснована на спільному використанні методу продовження по параметру і методу Ньютона-Канторовича. Практична реалізація методу здійснюється у вигляді програм розрахунків на ПЕОМ. При цьому час рахунку залежно від складності задачі не перевищує 2-5 хв. для ПЕОМ із оперативною пам'яттю 16Гб і частотою процесора 2800 МГц. Для верифікації методу проведено ряд експериментів, що показують високий збіг результатів чисельних розрахунків і експерименту. Практичне використання обчислювального алгоритму встановило ряд переваг у порівнянні з відомими засобами реалізації інших методів аналогічного призначення. До них можна віднести високу швидкість збіжності чисельних розв'язків у поєднанні із швидкодіючими алгоритмами розв'язку систем рівнянь, які дозволяють розв'язувати принципово нові задачі і значно скорочувати час розрахунків, а також підвищувати ефективність використання ПЕОМ. Для дослідження опорних поверхонь трибоспрямижень необхідно в першу чергу отримати геометрію об'єкта в агрегатному або в локальному стані. Якщо вважати, що в початковому стані досліджуваний елемент перебуває в рівновазі, то внаслідок додавання навантажень він деформується, приймаючи просторову форму поздовжньої осі, яка значно відрізняється від первинної. При цьому як початкова, так і деформована геометрія поздовжньої осі елемента може значно відрізнятись від

передбачуваної окружності, тобто – це ще не еліпс, але вже й не окружність. Таким чином, опорну поверхню можна розглядати як деформівне, геометрично нелінійне тверде тіло. При цьому геометрією поверхні може бути як окружність, так і деяка інша форма кривої, наприклад, еліпс із незначним співвідношенням осей і т.п., яка виникла внаслідок зношування поверхонь тертя або обумовлена технологічними параметрами. Процеси, що виникають у контактних поверхнях трибоспряження можуть бути відображені на екрані дисплея у реальному часі та одержані у графічному вигляді графіками, таблицями або рисунками. Застосовуючи запропоновану методику, можна без значної перебудови обчислювальних алгоритмів міняти характер дії навантажень, одержувати необхідні параметри напружено-деформованого стану трибоспряжень в залежності від змінюваної за рахунок деформації геометрії контактних поверхонь. При деяких раптово виникаючих умовах навантаження (наприклад, при додатку будь-якого навантаження, втраті стійкості, зміні жорсткості унаслідок зносу тощо) можна припинити розв'язок і після зміни певних параметрів задачі відновити його знову, починаючи з перерваного кроку. Простота використання, наочність, швидкість отримання результатів роблять методику зручною для використання інженерами при розрахунках і в технологічних операціях.