

$$\frac{dM}{d\varphi} = \frac{J_k}{k} = \frac{\pi \cdot (r_2^4 - r_1^4)}{2 \cdot c \cdot \sigma^{0.5}} \quad (15)$$

Тогда коэффициент, учитывающий влияние отклонения от плоскостности на угол наклона в стыке, определяется следующим выражением:

$$\mu_\varphi = \frac{(r_2^4 - r_1^4) \cdot c \cdot \sigma^{0.5}}{\Delta \left[\frac{c \cdot \sigma^{0.5} (r_2^4 - r_1^4)}{\Delta} - \frac{\Delta x \cdot (r_2^6 - r_1^6)}{2\Delta} - \frac{\Delta y (r_2^6 - r_1^6)}{6\Delta r_2^6} \right]}, \quad (16)$$

где Δ – величина наибольшего отклонения от плоскостности, *мкм*.

Выводы. Таким образом, зная коэффициент μ_φ по формуле (16) и угол φ , рассчитанный по формуле (6), можно определить фактический угол наклона стыка с учетом отклонения от плоскостности и оценить влияние этого фактора на точность и качество обработки.

При реальных давлениях и неточностях изготовления и износах коэффициент μ_φ может достигать значений 3-4, а при бoльших отклонениях – и бoльше. Если не осуществляется взаимная пригонка поверхностей, то даже малые отклонения от плоскостности, измеряемые микронами, приводят к существенному увеличению упругих перемещений даже при низких давлениях.

Полученные зависимости носят общий характер и могут быть использованы при расчетах других случаев контактирования кольцевых стыков, например, при расчетах погрешностей закрепления при обработке заготовок установленных на кольцо, фрикционных муфт, кольцевых упорных подшипников скольжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений / В.Корсаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 277с.
2. Левина З. Контактная жесткость машин / З.Левина, Д.Решетов. – М.: Машиностроение, 1971. – 264с.

УДК 622.625.28

ЗІБОРОВ К.А., к.т.н., доцент

ДВНЗ «Національний гірничий університет»

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАЧІ РУХУ ТЕРТЯМ В ШАХТНИХ ЛОКОМОТИВАХ

Вступ. Надійна робота більшості сучасних високопродуктивних видів транспорту (стрічкові конвеєри, залізничний, автомобільний транспорт тощо) забезпечується умовами фрикційної взаємодії контактуючих поверхонь. Для стрічкових конвеєрів – це зчеплення приводного барабана зі стрічкою, для залізничного транспорту – колеса з рейкою, для автомобільного – колеса з ґрунтом.

Коефіцієнт зчеплення залежить від багатьох факторів. До найважливіших з них відносяться вигляд і стан поверхні контактуючих тіл, наявність або відсутність мастила (масла або вологи, колоїдних речовин і т.п.), температура поверхні на плямі контакту, геометричні та реологічні характеристики контактуючих тіл, вид напруженого стану матеріалу на плямі контакту, характер прикладення навантаження.

Більшість досліджень у цьому напрямку стосувалося взаємодії двох контактуючих тіл в ідеальних умовах без урахування безлічі факторів, що впливають на процес зчеплення тіл взагалі. Такі дослідження дозволяють глибше зрозуміти фізику процесу, проте неоднакові умови експериментів неминуче тягнуть за собою і різні точки зору на природу тертя.

Молекулярна теорія пояснює тертя взаємодією молекул дотичних тіл як результат подолання сил молекулярного тяжіння і відштовхування, однак не пояснює таких чинників, як залежність коефіцієнта тертя від тиску, швидкості ковзання і т.д.

Існує концепція, що тертя виникає через пластичне відтискування матеріалу і подолання містків зварювання [1]. Передбачається, що тертя в основному обумовлено опором на зріз містків холодного зварювання контактуючих тіл. При цьому об'ємним деформуванням твердих тіл нехтується.

І.В.Крагельський в своїх дослідженнях [2, 3] вважає, що великий вплив на силу тертя надає передеформування матеріалу контактуючих поверхонь, викликане адгезією та зминанням. Процес передеформування полягає в утворенні валика і складок в зоні контакту. Передеформування може бути пружним або пластичним.

Теорії передачі руху тертям присвячені численні роботи, що пов'язано з гострою актуальністю проблеми. Багато з них застаріли, але і сучасні роботи в цій області не можуть чітко пояснити фізику явищ, що відбуваються на контактні взаємодіючих тіл.

Більш реальне фізичне пояснення процесів, що відбуваються в конкретних умовах фрикційної взаємодії пари колесо-рейка, міститься в роботах Д.К.Мінова [5], А.Ю.Ішлінського [6], Ю.М.Лужнова, І.П.Ісаєва [7, 8]. Також представляє інтерес робота, яка розкриває механізм зчеплення даної пари з урахуванням фонного тертя [4].

Д.К.Мінов при дослідженні взаємодії колеса з рейкою враховує не тільки ковзання однієї поверхні по іншій, але і пружне деформування цих тіл. Одержані ним та іншими авторами емпіричні залежності коефіцієнта зчеплення від швидкості відносного ковзання колеса і рейки показують, що зі збільшенням швидкості відносного ковзання значення коефіцієнта зчеплення спочатку зростає, а після досягнення деякого значення зменшується. Знайдені аналітичні вирази дозволяють описати певну ділянку функціональної залежності коефіцієнта зчеплення від швидкості відносного руху [5, 8].

Як і всяке складне фізичне явище, процес зчеплення двох контактуючих поверхонь слід розглядати, абстрагуючись від нашарування факторів, які можна виключити з розгляду в першому наближенні, ускладнюючи і уточнюючи завдання надалі введенням нових факторів, від яких залежить величина коефіцієнта зчеплення. Навіть вирішуючи завдання про визначення коефіцієнта тертя (зчеплення) двох тіл, що контактують у площині (Кулона-Амонтона), ми вводимо багато ідеалізацій. Контактуючі тіла повинні мати високу ступінь точності обробки, оскільки навіть невелика помилка в не-паралельності поверхонь може викликати значний розкид значень сил нормального тиску, а при наявності зсуву ділянки, прилеглі до точки А, будуть мати більше його значення, ніж ділянки, прилеглі до точки В (рис.1). Таким чином, і при ідеальних умовах не можна забезпечити рівність швидкостей переміщення поверхонь контактуючих тіл і сталість умов зчеплення. Тому при проведенні аналітичних досліджень слід виходити з елементарної площадки поверхонь контактуючих тіл.

Отже, процес взаємодії контактуючих тіл відрізняється великою складністю як у фізичному, так і в аналітичному плані. В даний час не існує єдиного підходу до дослідження даного процесу, що породжує безліч аналітичних виразів для його опису. Таке становище викликане тим, що більшість авторів виходить з позицій взаємодії контактуючих поверхонь, а не реальних фізичних тіл з притаманними їм пружними характеристиками та умовами навантаження на площадці контакту.

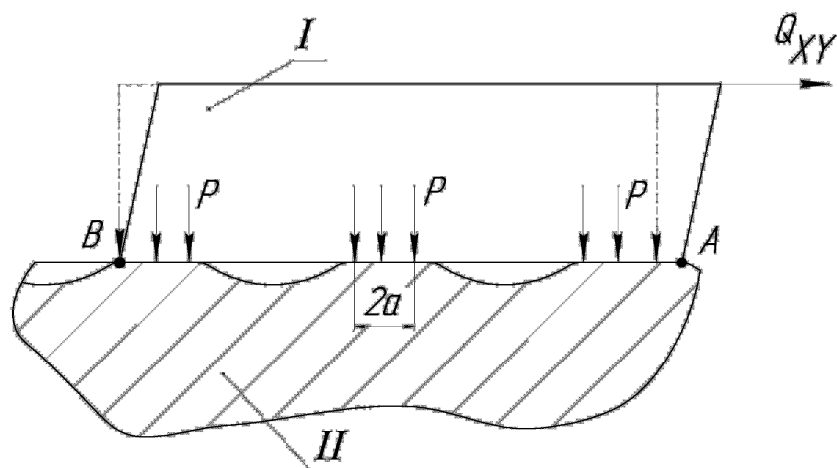


Рисунок 1 – Пружно-фрикційна взаємодія тіла з поверхнею при наявності тангенціальної сили

Постановка задачі. Тому задача дослідження полягає у розробці основних теоретичних положень, що дозволяють з єдиних позицій підходити до вирішення різної за умовами взаємодії контактуючих тіл.

Результати роботи. Для спрощення первинних аналітичних викладок і пояснення фізики процесу розглянемо чисто пружне деформування матеріалу контактуючих тіл.

Виходимо з сучасних уявлень про взаємодію двох тіл, одне з яких II (рис.2) нерухоме (жорстко закріплене на підставці), а до іншого I прикладена сила

$$Q_{xy} = \tau dx dy, \tag{1}$$

де τ – напруження зсуву, що виникають на площадці контакту, Па; dx и dy – розміри елементарної площадки контакту, м.

Крім того, тіло I діє на тіло II з силою

$$Q_z = p dx dy, \tag{2}$$

прикладеної по нормалі до площадки контакту.

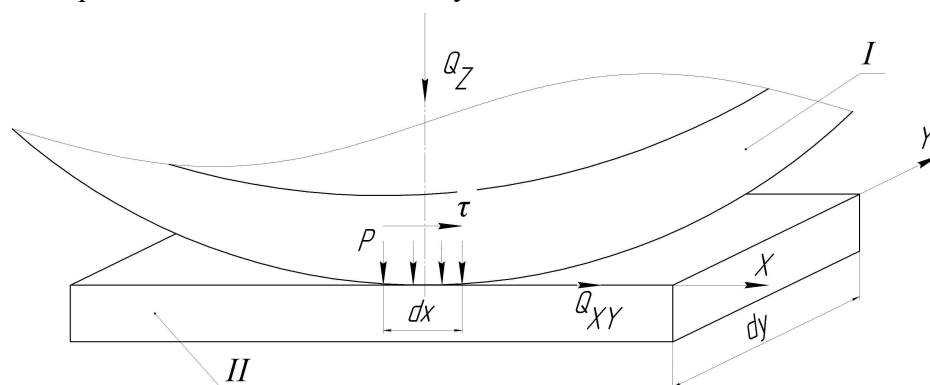


Рисунок 2 – Розрахункова схема взаємодії контактуючих плоских тіл

Згідно з визначенням коефіцієнт зчеплення

$$f = \frac{Q_{xy}}{Q_z} = \frac{\tau}{p}, \tag{3}$$

тобто напруження зсуву

$$\tau = fp. \tag{4}$$

Як випливає з виразу (3), якщо $\tau = 0$, коефіцієнт зчеплення також дорівнює нулю. Із збільшенням зсувного навантаження коефіцієнт зчеплення збільшується. У початковий період прикладення зсувного навантаження [5] τ збільшується за рахунок пружної деформації виступів шорсткості і самих тіл. Контактують поверхні неідеальні, тому до якоїсь певної величини навантаження відбувається зчеплення виступів шорсткості поверхні одного тіла з поверхнею іншого аж до пружно-пластичного деформування поверхневих шарів. Відносний зсув поверхонь контактуючих тіл при прикладенні τ відбувається за рахунок пружної деформації виступів шорсткості при зсувному навантаженні. Для кожного з контактуючих тіл величина деформації визначається виразами:

$$U_1'' = h_1' \frac{\tau}{E_1}, \quad U_2'' = -h_2' \frac{\tau}{E_2}, \quad (5)$$

де E_1 і E_2 – модулі пружності матеріалу контактуючих тіл, Па; h_1' і h_2' – умовна "висота деформованого шару" – розмірний коефіцієнт, що характеризує величину і характер розподілу шорсткості поверхонь, м.

При збільшенні граничної величини τ швидкість деформування буде збільшуватися. Таким чином, вираз для визначення коефіцієнта зчеплення має наступний вигляд:

$$f = \frac{V_{12}'}{\frac{h_1'}{E_1} + \frac{h_2'}{E_2}},$$

тобто f пропорційний швидкості відносної деформації.

Якщо деформація $U_{12} = U_1 - U_2$ (а значить і швидкість цієї деформації) перевищує певну величину, відбувається так званий зрив зчеплення [5], і збільшення швидкості відносної деформації призводить до зменшення коефіцієнта зчеплення.

Більш уважний аналіз запропонованих у роботах [5, 8] аналітичних залежностей та результатів експериментальних досліджень для коефіцієнта зчеплення як функції швидкості відносного ковзання по поверхні показує, що найбільш прийнятна функція аналогічна функції синус-перетворення при поданні ядра релаксації у вигляді дробово-експоненційної функції. В інтерпретації для даного випадку функція залежності зсувних навантажень від відносної швидкості має вигляд:

$$\tau = \mu_0 p \frac{\alpha V_{12}'}{\delta V_{12}'' + \beta V_{12}' + \lambda_1 p}, \quad (6)$$

де α , β , δ – коефіцієнти, що враховують стан поверхні контактуючих тіл, тривалість контакту, спосіб прикладання навантаження і т.і.; λ_1 – коефіцієнт, що враховує пружні характеристики матеріалу, величину і характер розподілу виступів шорсткості контактуючих поверхонь

$$\lambda_1 = \frac{\eta_1'}{E_1} + \frac{\eta_2'}{E_2}, \quad (7)$$

η_1' , η_2' – безрозмірні коефіцієнти, що враховують параметри шорсткості поверхні.

Вираз (8) характеризує залежність коефіцієнта зчеплення від швидкості відносного зміщення прилеглих шарів контактуючих тіл:

$$f = \mu_0 \cdot \frac{\alpha V_{12}'}{\delta V_{12}'' + \beta V_{12}' + \lambda_1 p}. \quad (8)$$

Експериментальні дослідження дозволяють вимірювати залежність коефіцієнта зчеплення від відносної швидкості руху будь-яких точок контактуючих тіл. Такими точками можуть, наприклад, бути обід колеса і головка рейки, серединна поверхня стрічки конвеєра і поверхня барабана (при наявності футерівки – поверхня самого барабана) та т.і.

Площина прикладення тягового зусилля зазвичай не збігається з площиною контакту, відбувається складне деформування контактуючих тіл. Тому при вивченні процесу взаємодії контактуючих тіл необхідно враховувати також конструктивні особливості і пружні характеристики контактуючих тіл в цілому. Особливо це важливо при вивченні процесу взаємодії рухомих тіл.

Розглянемо найбільш простий і найбільш загальний випадок контактування двох тіл. Для цього виділимо на ділянці контакту смужку шириною Δ і довжиною $2a$ (рис.3), умовна висота прикладення рухомого зусилля до одного тіла – h_1'' , до іншого – h_2'' .

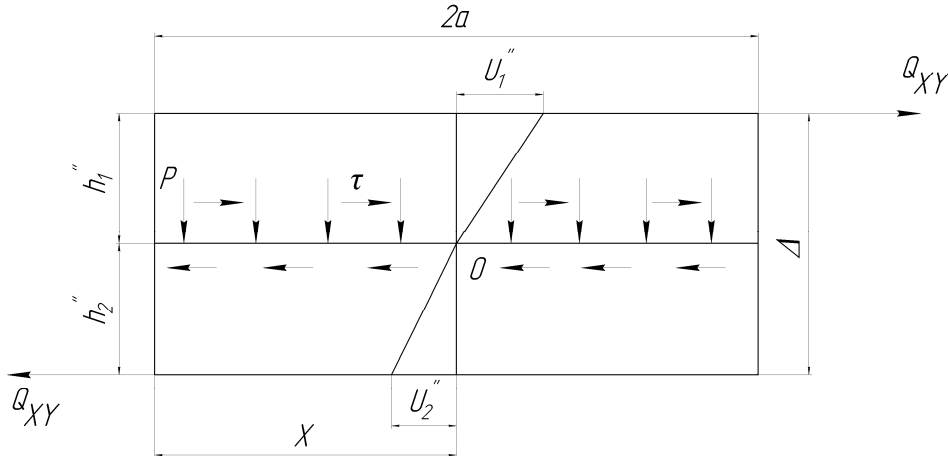


Рисунок 3 – Розрахункова схема взаємодії реальних контактуючих тіл

Зміщення шарів на відстань x від початку площадки контакту (щодо площини контакту):

$$U_1'' = \frac{2\sigma_1 h_1''}{E_1}, \quad U_2'' = \frac{2\sigma_2 h_2''}{E_2}, \quad (9)$$

де σ_1 і σ_2 – розтягуючі зусилля в площині прикладення сили Q_{xy} , Н.

Або, враховуючи, що

$$\sigma = \frac{0}{2h} \int_0^x \tau dx$$

при $\tau = const$, отримуємо:

$$U_1'' = \frac{\tau x}{E_1}, \quad U_2'' = -\frac{\tau x}{E_2}.$$

У більш загальному випадку

$$U_1'' = \frac{\eta_1'' \tau x}{E_1}, \quad U_2'' = -\frac{\eta_2'' \tau x}{E_2}, \quad (10)$$

де η_1'' і η_2'' – безрозмірні коефіцієнти, що враховують конструктивні особливості контактуючих тіл.

Відносне зміщення точок у площинах додатку зусилля Q_{xy}

$$U_{12}'' = U_1'' - U_2'' = \left(\frac{\eta_1''}{E_1} + \frac{\eta_2''}{E_2} \right) \tau x$$

або, позначаючи

$$\lambda_2 = \frac{\eta_1''}{E_1} + \frac{\eta_2''}{E_2}, \quad (11)$$

$$U_{12}'' = \lambda_2 \tau x. \quad (12)$$

Перекочування одного тіла по іншому (режим вільного кочення колеса) зі швидкістю V еквівалентно переміщенню площадки контакту з тією ж швидкістю, що призводить до залежності

$$\frac{dx}{dt} = V.$$

Тоді з останнього виразу швидкість відносної пружної деформації контактуючих тіл має вигляд:

$$V = \frac{dU_{12}''}{dt} = \lambda_2 \tau V. \quad (13)$$

Повна швидкість відносного зміщення контактуючих тіл

$$V_{12} = V_{12}' + V_{12}'', \quad (14)$$

звідки

$$V_{12}' = V_{12} - V_{12}'',$$

що після підстановки у (8) з урахуванням (13) дає

$$\tau = \mu_0 p \cdot \frac{\alpha(V_{12} - \lambda_2 \tau V)}{\delta(V_{12} - \lambda_2 \tau V)^2 + \beta(V_{12} - \lambda_2 \tau V) + \lambda_1 p}.$$

Значення τ можна визначити з рівняння

$$\delta \lambda_2^2 V^2 \tau^3 - (2\delta V_{12} + \beta) \lambda_2 V \tau^2 + (\delta V_{12}^2 + \beta V_{12} + \lambda_1 p + \mu_0 p \alpha \lambda_2 V) \tau - \mu_0 p \alpha V_{12} = 0. \quad (15)$$

Аналіз виразу (15) показує, що внаслідок малості значень τ і λ_2 першими двома членами рівняння можна знехтувати в порівнянні з іншими.

Тоді

$$\tau = \mu_0 p \frac{\alpha V_{12}}{\delta V_{12}^2 + \beta V_{12} + \lambda_1 p + \lambda_2 p \mu_0 \alpha V}. \quad (16)$$

Враховуючи дискретний характер формування плями контакту (рис.1), введемо у вираз для коефіцієнта зчеплення "кулонівський двочлен" $1 + \frac{kS_\phi}{p}$, який визначає вплив тиску p по площадці контакту і величину S_ϕ фактичної площадки контакту. З урахуванням цього вираз (16) може бути представлено як

$$\tau = \mu_0 p \frac{\alpha V_{12} (1 + \frac{kS_\phi}{p})}{\delta V_{12}^2 + \beta V_{12} + \lambda_1 p + \lambda_2 p \mu_0 \alpha V (1 + \frac{kS_\phi}{p})}. \quad (17)$$

Як випливає з виразу (16), залежність коефіцієнта зчеплення від швидкості відносного руху V_{12} має вигляд, представлений на рис.4, тобто є ділянка пружної взаємодії I, що характеризується зростанням f зі збільшенням V_{12} , і ділянка відносного проковзування тіл II, що призводить до зменшення f .

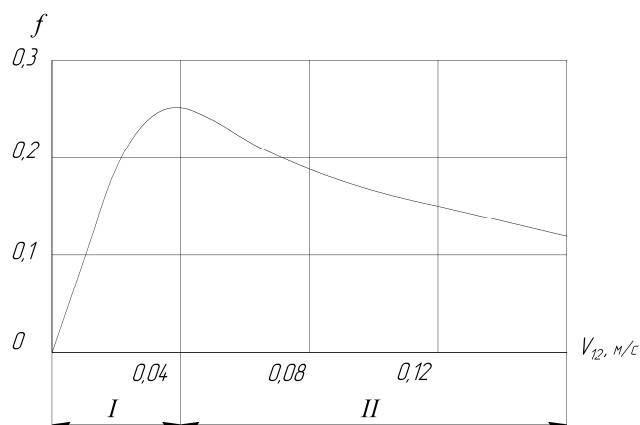


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта зчеплення від швидкості відносного ковзання

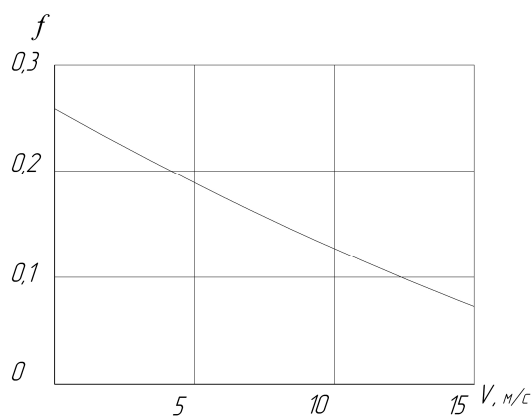


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнту зчеплення від швидкості переміщення площадки контакту

Максимальне значення коефіцієнта f буде мати місце при швидкості відносного руху контактуючих тіл

$$V_{12} = \sqrt{\frac{\lambda_1 p + \lambda_2 p \mu_0 \alpha V}{\delta}}$$

Тоді

$$f_{\max} = \mu_0 \alpha \frac{-\beta + 2\sqrt{\delta(\lambda_1 p + \lambda_2 p \mu_0 \alpha V)}}{4\delta(\lambda_1 p + \lambda_2 p \mu_0 \alpha V) - \beta^2} \quad (18)$$

Висновок. Залежність коефіцієнта зчеплення від швидкості руху контактуючих тіл (руху колеса по рейці) (рис.5) показує, що зі збільшенням V значення коефіцієнта зчеплення при постійній швидкості відносного руху V_{12} зменшується за криволінійним законом, що також відповідає результатам експериментальних досліджень [9, 10].

ЛІТЕРАТУРА

1. Боуден Ф. Трение и смазка / Ф.Боуден, Д.Тейбор. – М.: Машгиз, 1960. – 123с.
2. Крагельский И.В. Трение и износ / Крагельский И.В. – М.: Машиностроение, 1968. – 276с.
3. Крагельский И.В. Коэффициенты трения / И.В.Крагельский, Н.Э.Виноградова. – 2-е издание. – М.: Машгиз, 1962. – 227с.
4. Марков Д.П. Механизмы сцепления пары колесо – рельс с учетом фоновго трения / Д.П.Марков // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 6. – С.23-27.
5. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей / Минов Д.К. – М.: Транспорт, 1965. – 266с.
6. Ишлинский А.Ю. Трение качения / А.Ю. Ишлинский // Прикладная математика и механика. – 1968. – Вып. 2. – С.16-23.
7. Лужнов Ю.М. Физикохимия сцепления. / Ю.М.Лужнов // Труды III конгресса Евротриб-81. – Варшава. – 1981. – Вып. 1. – С.315-325.
8. Исаев И.П. Проблемы сцепления колес локомотива с рельсами / И.П.Исаев, Ю.М.Лужнов // М.: Машиностроение, 1985. – 238с.
9. Зиборов К.А. Условия образования и реализации силы сцепления рабочих поверхностей контактирующей пары „колесо-рельс” / К.А.Зиборов, И.А.Таран // Науковий вісник НГУ. –2006. – №6. – С.62-64.
10. Зиборов К.А. Относительное проскальзывание колеса и рельса при наличии промежуточной среды / К.А.Зиборов, И.А.Таран // Науковий вісник НГУ. –2007. – №7. – С.62-64.