

МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 620 (045)

О.А. Вишневецький

ПРОЦЕС ЗНОШУВАННЯ ЦИЛІНДРА І ПЛОЩИНИ СФЕРИЧНИМИ АБРАЗИВНИМИ ЧАСТИНКАМИ

Національний авіаційний університет, e-mail:eco@nau.edu.ua; www.nau.edu.ua.

В роботі знайдено розподіл навантаження при взаємодії тіл циліндричної та плоскої форми. Спроцентований розв'язок контактної задачі про зношування циліндра, площини та сферичних абразивних частинок.

Ключові слова: абразивне зношування, схема контакту циліндр площина, сферичні частинки.

Вступ

Схема контакту циліндр з площиною є найбільш поширеним у транспортному, авіаційно-космічному, будівельному та інших видах машино-будівництва. В наслідок дії тертя та наявності шорсткості має місце зношування контактуючих поверхонь, що призводить до порушення ритму стандартної роботи машин та механізмів.

Процес зміни форми зношуваних поверхонь залежить від циклічності навантаження, швидкості обертання, твердості, пластичності, втомлюваності матеріалів та багатьох інших факторів. Розробників виробів цікавить термін безвідмовної роботи техніки, а також, момент початку зношування, яке призведе до виходу їх з ладу. Для цього треба прогнозувати та контролювати можливі зміни форми контактуючих поверхонь при умовах, які визначають вихід з ладу машин та механізмів під впливом відповідних навантажень та абразивних частинок.

Аналіз останніх досліджень

Розвитку проблеми можливої зміни форми контактуючих поверхонь деталей під дією абразиву приділялось багато уваги в наукових працях.

В роботі [1] розглянуто питання руху важкого тіла обертання по абсолютно шорсткій поверхні, але в ній недостатньо уваги приділено процесу зміни форм контактуючих поверхонь при зануренні циліндра в матеріал, що має плоску поверхню, а також розподілу навантаження вздовж поверхні взаємодії та абразивному зношуванню.

Фактори, що впливають на можливу зміну форми поверхонь контактуючих деталей при абразивному зношуванню, розглянуто в роботі [2].

В роботі [3] розв'язувалася проблема взаємодії циліндричних та сферичних підшипників, що контактують з матеріалом основи.

Питання зміни форми циліндричних тіл в результаті їх взаємодії з іншими поверхнями розглянуте в роботі [4], проте недостатньо розглянуте питання відповідного зношування контактуючого тіла.

Не в достатній мірі розглянуте питання визначення розподілу навантаження по поверхні контакту, а також контактної задачі з сферичними абразивними частинками в роботі [5].

Процес зношування поверхонь контактуючих тіл при екстремальних умовах розглянуто в роботі [6], однак слід більше висвітлити питання прогнозування та попередження виходу з ладу машин та механізмів.

В роботі [7] розглянута контактна трибологічна задача розподілу навантаження між сферичними абразивними частинками радіуса r . При заданому просторовому розташуванню система рівнянь для визначення розподілу зусиль P_i між частинками i радіусів a_i контактних плям має вигляд:

$$h_i - D = \frac{a_i^2}{r} + \frac{1-\nu^2}{\pi E} \sum_{j=1}^N \frac{P_j}{l_{ij} \sqrt{1-(a_i/l_{ij})^2}}; P_i = \frac{4Ea_i^3}{3r(1-\nu^2)} + \frac{2}{\pi} \sum_{j=1}^N p_j \left[\frac{a_i}{l_{ij} \sqrt{1-(a_i/l_{ij})^2}} - \arcsin \frac{a_i}{l_{ij}} \right] \quad (1)$$
$$P = \sum_{i=1}^N P_i, i=1,2,\dots,N, i \neq j$$

де l_{ij} – відстань між i -ою і j -ою сферичними частинками, D – заглиблення частинки.

При розв'язанні системи виникають труднощі, пов'язані з громіздкими виразами і великою кількістю рівнянь в системі. Ці недоліки можна владнати маючи одне середнє значення навантаження на всі сферичні частинки.

В роботі [8] розглянута модель інтенсивності зношування сферичних абразивних частинок

$$\frac{d\omega_j}{dt} = K_{\omega} \left(\frac{P_j}{P^*} \right)^{\alpha} \left(\frac{V_j}{V^*} \right)^{\beta}, j=1,2,\dots,N, \quad (2)$$

Бажано за можливістю спростити процес визначення швидкості їх лінійного зносу.

Невирішені частини проблеми. Важливим виглядає вирішення проблеми визначення розподілу навантаження на поверхню тертя а також на сферичні абразивні частинки, які розташовані між циліндром та площиною. У зв'язку з цим виглядає доцільним визначити розподіл навантаження вздовж дуги перерізу нормальною до осі циліндра площиною. Обертальний рух циліндра призводить до поступового зношування плоскої поверхні. Під час цього процесу відбувається лінійне зношування з відповідною зміною форм поверхонь під дією абразиву.

Необхідно розв'язати контакту задачу про зношування циліндра і площини сферичними абразивними частинками.

Цілі статті

1. Знайти розподіл навантаження вздовж дуги нормального перерізу тертьових поверхонь при взаємодії тіл циліндричної та плоскої форми.
2. Спростити розв'язок контактної задачі трибології про зношування циліндра, площини та сферичних абразивних частинок.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо контакт спряження циліндричного тіла з плоским тілом при наявності шорсткості, навантаження та сферичних абразивних частинок. Циліндричне тіло притискає до поверхні плоского тіла сила P_0 [9]. Під час обертання циліндра навколо своєї осі відбувається процес зношування контактуючих поверхонь при відповідній зміні їх форм. Нехай вісь Oz декартової системи координат $Oxyz$ напрямлена вздовж осі циліндра.

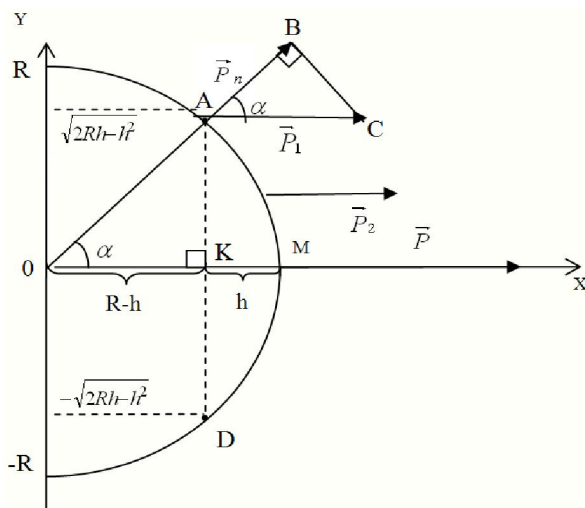


Рис.1. Прив'язка проекції циліндра та поверхні плоского тіла на площину Oxy до прямокутної системи координат, де пряма AD відповідає рівню поверхні зразка, h – величина лінійного зносу, точка O – проекція осі ролика на площину Oxy .

На рис.1 схематично показаний переріз циліндричного тіла перпендикулярно до осі площини.

Розподілене вздовж осі Oy навантаження P_2 знайдемо, як розв'язок інтегрального рівняння з крайовими умовами, записаними у вигляді наступної системи.

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2Rh-h^2}} \int_0^{\sqrt{2Rh-h^2}} P_2(y) dy = \frac{P_0}{2} \\ P_2(y) = ay + b \\ P_2(R) = 0 \\ P_2(\sqrt{2Rh-h^2}) = P_1 \end{cases} \quad (3)$$

Знайдемо ядро першого в системі (3) інтегрального рівняння у вигляді поданому в другому рівнянні системи.

$$P_2(y) = \frac{P_1(R-y)}{R-\sqrt{2Rh-h^2}} \quad (4)$$

Використовуючи формулу ядра $P_2(y)$ і перше рівняння системи (3) знайдемо навантаження P_1 .

$$\frac{1}{\sqrt{2Rh-h^2}} \int_0^{\sqrt{2Rh-h^2}} \frac{P_1(R-y)}{R-\sqrt{2Rh-h^2}} dy = \frac{P_0}{2} \quad (5)$$

Константу P_1 знайдемо, розв'язуючи наступне рівняння:

$$\frac{P_1}{\sqrt{2Rh-h^2}} \int_0^{\sqrt{2Rh-h^2}} \frac{R-y}{R-\sqrt{2Rh-h^2}} dy = \frac{P_0}{2} \quad (6)$$

Після розв'язання рівняння (6) отримаємо $P_1 = \frac{P_0(R-\sqrt{2Rh-h^2})}{2R-\sqrt{2Rh-h^2}}$ (7)

Навантаження розподілено вздовж осі Оу: $P_2(y) = \frac{P_0(R-y)}{2R-\sqrt{2Rh-h^2}} = \frac{P_0\left(1-\frac{y}{R}\right)}{2-\sqrt{\frac{2h}{R}-\left(\frac{h}{R}\right)^2}}$ (8)

При $y=0$ отримаємо наступне значення навантаження: $P_2(0) = P = \frac{P_0 R}{2R-\sqrt{2Rh-h^2}}$ (9)

При $y=R$ навантаження $P_2(y)$ буде дорівнювати нулю, тобто $P_2(R) = 0$ (10)

Для перевірки коректності отриманих залежностей знайдемо суму проєкцій розподіленого вздовж осі Оу навантаження при $y > 0$ на вісь Ох.

$$\frac{1}{\sqrt{2Rh-h^2}} \int_0^{\sqrt{2Rh-h^2}} \frac{P_0(R-y)}{2R-\sqrt{2Rh-h^2}} dy = \frac{P_0}{2} \quad (11)$$

Результати обчислення інтеграла (11) показують правильність методики знаходження ядра та розв'язання інтегрального рівняння з крайовими умовами.

Знайдемо формулу розподілу навантаження вздовж осі Оу при $y < 0$, розв'язуючи систему рівнянь у складі якої: інтегральне рівняння; дві крайові умови; функція, що задає ядро інтегрального рівняння.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\sqrt{2Rh-h^2}} \int_{-\sqrt{2Rh-h^2}}^0 P_2(y) dy = \frac{P_0}{2} \\ P_2(y) = ay + b \\ P_2(-R) = 0 \\ P_2\left(-\sqrt{2Rh-h^2}\right) = P_1 \end{array} \right. \quad (12)$$

Ядро інтегрального рівняння, поданого в системі (12) другим після розв'язання аналогічного розв'язання системи (3), матиме вигляд:

$$P_2(y) = \frac{P_1(R+y)}{R-\sqrt{2Rh-h^2}} \quad (13)$$

Після підстановки ядра (13) в перше рівняння системи (12) отримаємо формулу розподілу навантаження вздовж осі Оу.

$$P_2(y) = \frac{P_0(R+y)}{2R-\sqrt{2Rh-h^2}} \quad (14)$$

Для перевірки коректності отриманих залежностей знайдемо суму проєкцій розподіленого вздовж осі Оу навантаження при $y < 0$ на вісь Ох.

$$\frac{1}{\sqrt{2Rh-h^2}} \int_{-\sqrt{2Rh-h^2}}^0 \frac{P_0(R+y)}{2R-\sqrt{2Rh-h^2}} dy = \frac{P_0}{2} \quad (15)$$

Таким чином сума всіх проєкцій розподіленого навантаження вздовж осі Оу на вісь Ох дорівнює P_0 , причому навантаження в точці А (при $y=0$) будемо рахувати тільки один раз.

Нормальну складову навантаження $P_n(\alpha)$ знайдемо з прямокутного $\triangle ABC$, зображеного на рис.1.

$$P_n(\alpha) = P_0(1 - \sin \alpha) \cos \alpha \left/ \left(2 - \sqrt{2 \frac{h}{R} - \left(\frac{h}{R} \right)^2} \right) \right. \quad (16)$$

$$\text{Середнє навантаження враховуючи [9]: } P_{\text{сер.}} = \frac{\int P_n(l) dl}{l} \quad (17)$$

де l – довжина дуги АМ.

Середнє значення навантаження розподіленого вздовж дуги (ортогонального перерізу поверхні взаємодії площиною при $y > 0$).

$$P_{\text{сер.}} = P_0 \sqrt{2 \frac{h}{R} - \left(\frac{h}{R} \right)^2} \left/ \left(2 \arccos \left(1 - \frac{h}{R} \right) \right) \right. \quad (18)$$

Аналогічну формулу отримаємо для дуги взаємодії, що відповідає значенням $y < 0$.

Середнє значення навантаження P_c вздовж дуги взаємодії, має наступний вигляд.

$$P_c = P_0 \sqrt{2 \frac{h}{R} - \left(\frac{h}{R} \right)^2} \left/ \arccos \left(1 - \frac{h}{R} \right) \right. \quad (19)$$

Система рівнянь для визначення розподілу зусиль P_i між сферичними частинками радіуса r і радіусів a і контактних плям має вигляд:

$$h_i - D = \frac{a_i^2}{r} + \frac{1 - \nu^2}{\pi E} \frac{P_c}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{l_{ij} \sqrt{1 - (a_i/l_{ij})^2}}, \quad P_i = \frac{4Ea_i^3}{3r(1 - \nu^2)} + \frac{2P_c}{\pi N} \sum_{j=1}^N \left[\frac{a_i}{l_{ij} \sqrt{1 - (a_i/l_{ij})^2}} - \arcsin \frac{a_i}{l_{ij}} \right] \quad (20)$$

де $i \neq j$,

При визначенні середнього значення навантаження на всі частинки значно спроститься

$$\text{процес визначення швидкості їх лінійного зносу } \frac{d\omega_j}{dt} = K \omega \left(\frac{P_c}{NP^*} \right)^\alpha \left(\frac{V_j}{V^*} \right)^\beta, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (21)$$

Висновки

1. Розроблена методика визначення розподілу навантаження вздовж дуги нормального перерізу тертьових поверхонь при взаємодії тіл циліндричної та плоскої форми.

2. Спрощено розв'язок контактної задачі трибології про зношування циліндра, площини та сферичних абразивних частинок.

Список літературних джерел

1. Мидлин И.М., Пожарицкий Г.К., Об устойчивости стационарных движений тяжёлого тела вращения по абсолютно шероховатой горизонтальной плоскости. – ПММ, 1965. – Вип.4. – Т.29.
2. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высш. Шк., 1991. – 319с.
3. Усов П.П., Галахов М.А. Контактные задачи с учётом износа для цилиндрических и сферических подшипников скольжения с тонким вкладышем//Машиностроение. -1986.-№ 3.-С.81-88.
4. Усов П.П., Галахов М.А. изнашивание жёстких цилиндрических тел. // Проблемы математики в физико-технических задачах. – М.: МФТИ, 1987. – С. 140-147.
5. Кузьменко А.Г. Износ при возвратно-поступательном движении цилиндра на плоскости (развитие решений)//Проблемы трибологии. –2007 – №1. С65-81.
6. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник – М. Машиностроение, 1986. – 224с.
7. Goryacheva I. G., Dobychin M. N. Multiple contact model in the problems of tribomechanics // Tribology International. 1991. V. 24. No. 1. P. 29-35.
8. Александров В. М., Коваленко Е. В. К теории контактных задач при наличии нелинейного износа // Изв. АН СССР. МТТ. 1982. № 4. С. 98-108.
9. Вишневецький О.А., Давидов О.С., Визначення середнього навантаження та тиску на поверхню тертя – основа моделювання процесу випробування матеріалів на абразивну зносостійкість.// Вісн. Київського Університету 2008. – №2. – С. 73 – 76.