

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НОМІНАЛЬНОГО КОНТАКТНОГО ТИСКУ ТА ТРИВАЛОСТІ НАТІКАННЯ ГАЗУ В ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕННЯХ

На основі теорії стохастичних процесів розроблені методи розрахунку основних характеристик контакту спряжених поверхонь циліндро-поршневих ущільнень. Результатом є створення інженерних методів розрахунку номінального контактного тиску та тривалості натікання газу в циліндро-поршневих ущільненнях, що працюють без змащення.

Ключові слова: контакт; номінальний контактний тиск; тривалість натікання газу; циліндро-поршневі ущільнення; профілограма.

O.G. TYMOSHCHUK

Khmelnytskyi National University

CALCULATION METHOD NOMINAL CONTACT PRESSURE AND DURATION OF SINTERS IN GAS CYLINDER-PISTON SEAL

Based on the theory of stochastic processes developed methods of calculating the basic characteristics of conjugate contact surfaces of cylinder-piston seals. The result is the creation of engineering methods for calculating the nominal contact pressure and duration sinters gas in the cylinder-piston seals that operate without lubrication.

Key words: contact; nominal contact pressure; duration sinters gas; cylinder-piston seal; profilohrama.

Вступ

На стадії інженерного проектування необхідно вміти оцінити натікання газового середовища в циліндро-поршневих ущільненнях. Методи розрахунку герметичності базуються на поєднанні фізичних законів, що описують процес натікання робочого середовища з закономірностями, що визначають характеристики контакту шорстких поверхонь, такі як міжконтактний об'єм, фактична площа контакту, середній зазор. Втрати робочого середовища залежать від кубу середнього зазору, тому похибка в 25% у визначенні цієї величини призводить до похибки в 95% при розрахунку натікань. Таким чином, точність розрахунку натікань великою мірою залежить від точності визначення характеристик контакту.

Існуючі методи розрахунку герметичності використовують формули визначення характеристик контакту за способом опорних кривих. Цей спосіб має низьку точність внаслідок того, що він не бере до уваги, що профілограма дає спотворене уявлення про поверхню, оскільки проходить не через вершини виступів, а схилами нерівностей профілю досліджуваної поверхні. Значення величини згладжування та максимальної висоти нерівностей, необхідні для визначення характеристик контакту, визначаються за способом опорних кривих з дуже низькою точністю; для точного визначення цих величин необхідно, щоб профілограма пройшла одночасно через найвищу вершину поверхні та через саму глибоку впадину, а ймовірність цього практично рівна нулю. Значно точніше характеристики контакту і величини натікання робочого середовища можна визначити за допомогою теорії стохастичних процесів.

Постановка проблеми у загальному вигляді

Розглянемо профілограму, записану в напрямку θ на шорсткій поверхні $z=z(x,y)$. Початок координат, а також осі Ox , Oy знаходяться на середній площині поверхні, висоти точок поверхні відмірюються від середньої площини. В силу кінематики руху елементів спряжених поверхонь, шорсткі поверхні циліндро-поршневих ущільнень можна розглядати як поверхні з сильною анізотропією, тобто їх можна характеризувати на підставі профілограм, записаної в поперечному напрямку. Оскільки задача про контактування двох шорстких поверхонь може бути зведена [1, 2] до задачі про контактування гладкої площини з еквівалентною шорсткою поверхнею, то саме цією розрахунковою схемою і будемо в подальшому користуватися. Підставою для використання такої розрахункової схеми є і те, що в беззмашувальних поршневих ущільненнях переважним чином використовуються металополімерні пари [3]. В таких парах середньоарифметичне відхилення Ra точок профілю полімерного матеріалу (типові значення – 0,8...2 мкм) є значно більшим за аналогічний показник металеві поверхні (типові значення – 0,025...0,05 мкм). З огляду на сказане вище, в подальшому розглядається контакт сильно анізотропної шорсткої поверхні (полімерна поверхня) з гладкою (металева поверхня).

Семенюк М.Ф. [4] розглядав Z як стохастичну функцію однієї змінної (стохастичний процес), а дану профілограму як реалізацію такого стохастичного процесу $z=z(r)$. Вважається, що процес $z(r)$ є стаціонарним нормальним із середнім

$$\overline{z(r)} = 0 \quad (1)$$

і кореляційною функцією

$$K_{\theta}(r) = \lim_{L_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{2L_0} \int_{-L_0}^{L_0} z(r_1) z(r_1 + r) dr_1. \quad (2)$$

Зручніше працювати із спектральною функцією, яка зв'язана з кореляційною функцією перетворенням Фур'є:

$$\Phi_{\theta}(k') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{\theta}(r) e^{-ik'r} dr. \quad (3)$$

Спектральні моменти $m_{n\theta}$ профілограми визначаються таким чином:

$$m_{n\theta} = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{\theta}(k') k'^n dk'. \quad (4)$$

Фізичний зміст спектральних моментів наступний. Спектральний момент нульового порядку m_0 є дисперсією висот точок поверхні, спектральний момент другого порядку m_2 визначає нахили нерівностей, а спектральний момент четвертого порядку m_4 – кривизни нерівностей поверхні.

Результати дослідження

На першому етапі розрахунку вважаємо поверхні поршня і циліндру в місці контакту гладкими. На другому етапі буде враховано, що поверхня поршня шорстка, а тому в міжконтактний зазор натікає газ, тиск якого впливає на контактний тиск в ущільненні. На рис. 1 представлена розрахункова схема першого етапу.

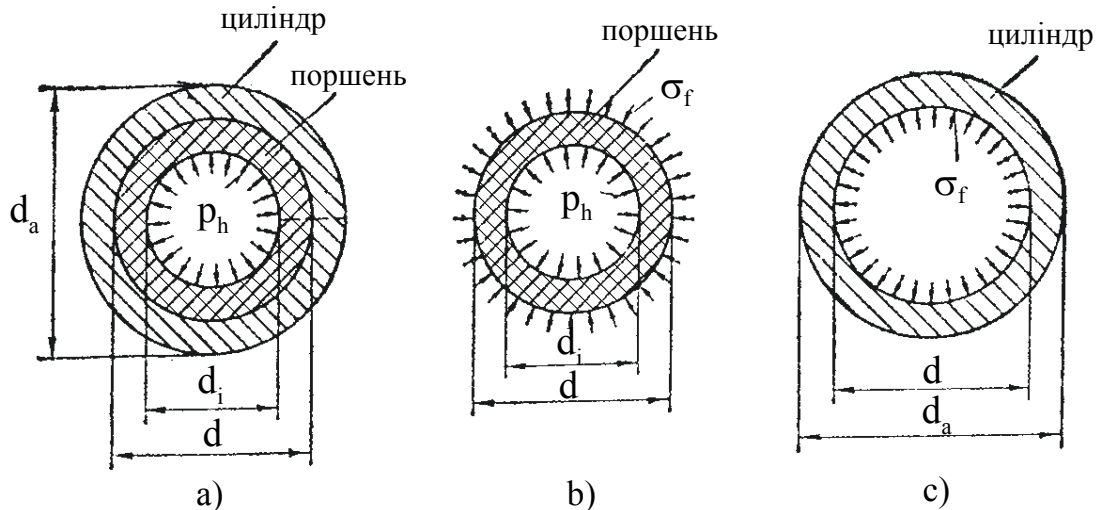


Рис. 1 Розрахункова схема ущільнення:
 а) сили, що діють в ущільненні; б) сили, що діють на поршень;
 в) сили, що діють на циліндр

Позначимо p_h – тиск газу всередині поршня-зразка, σ_f – номінальний контактний тиск в спряженні циліндр – поршень без врахування шорсткості. Тиск p_h діє на поршень з внутрішньої сторони, а тиск σ_f – зовні (рис. 1b). Приріст зовнішнього радіусу зразка-поршня знайдемо за формулою Ляме [5]:

$$u_p = \frac{1 - \nu_p}{E_p} \frac{d_i^2 p_h - d^2 \sigma_f}{d^2 - d_i^2} r + \frac{1 + \nu_p}{E_p} \frac{d_i^2 (p_h - \sigma_f)}{d^2 - d_i^2} r, \quad (5)$$

де ν_p, E_p – коефіцієнт Пуассона та модуль Юнга матеріалу поршня.

Інші величини, що входять в формулу (5), пояснені на рис. 1b.

Позначимо

$$k_p = (d_i/d)^2 \quad (6)$$

і запишемо (5) у вигляді:

$$\frac{u_p}{r} = \frac{2k_p p_h - [1 - \nu_p + k_p (1 + \nu_p)] \sigma_f}{(1 - k_p) E_p}. \quad (7)$$

Позначивши тепер

$$\chi_1 = \frac{2k_p}{(1-k_p)E_p}; \quad (8)$$

$$\chi_2 = \frac{1-\nu_p + k_p(1+\nu_p)}{(1-k_p)E_p}, \quad (9)$$

отримаємо:

$$\frac{u_p}{r} = \chi_1 p_h - \chi_2 \sigma_f. \quad (10)$$

На циліндр з внутрішньої сторони діє тиск σ_f (рис. 1с). Приріст внутрішнього радіуса циліндра знайдемо за формулою Ляме [5]:

$$u_c = \frac{1-\nu_c}{E_c} \frac{d^2 \sigma_f}{d_a^2 - d^2} r + \frac{1+\nu_c}{E_c} \frac{d_a^2 \sigma_f}{d_a^2 - d^2} r, \quad (11)$$

де ν_c, E_c – коефіцієнт Пуассона та модуль Юнга матеріалу циліндра.

Інші величини, що входять в формулу (11), пояснені на рис. 1с.

Позначимо

$$k_c = (d/d_a)^2 \quad (12)$$

і запишемо (11) у вигляді:

$$\frac{u_c}{r} = \frac{1+k_c + \nu_c(1-k_c)}{(1-k_c)E_c} \sigma_f. \quad (13)$$

Позначивши тепер

$$\chi_3 = \frac{1+k_c + \nu_c(1-k_c)}{(1-k_c)E_c}, \quad (14)$$

отримаємо:

$$\frac{u_c}{r} = \chi_3 \sigma_f. \quad (15)$$

Позначимо d' – зовнішній діаметр поршня та d'_c – внутрішній діаметр циліндра до зборки. При цьому діаметральний натяг складає:

$$\delta = d' - d'_c. \quad (16)$$

Зв'язок приросту радіусів циліндра та поршня визначається співвідношенням:

$$u_c = u_p + \frac{\delta}{2},$$

або

$$\frac{u_c}{r} = \frac{u_p}{r} + \frac{\delta}{2r}. \quad (17)$$

Підставимо в (17) вирази (10, 15):

$$\chi_3 \sigma_f = \chi_1 p_h - \chi_2 \sigma_f + \frac{\delta}{d}. \quad (18)$$

З (18) отримаємо:

$$\sigma_f = \frac{\chi_1}{\chi_2 + \chi_3} p_h + \frac{1}{\chi_2 + \chi_3} \frac{\delta}{d}. \quad (19)$$

Оскільки фізико-механічні властивості матеріалів циліндра та поршня сильно різняться (циліндр – сталевий, а поршень виготовлено з композиційного полімерного матеріалу), то $\chi_2 \gg \chi_3$. З врахуванням цього, отримуємо з (8, 9, 19) розрахункову формулу:

$$\sigma_f = \frac{2k_p}{1-\nu_p + k_p(1+\nu_p)} p_h + \frac{\delta(1-k_p)E_p}{d[1-\nu_p + k_p(1+\nu_p)]}. \quad (20)$$

Формула (20) придатна для розрахунків при будь-яких співвідношеннях зовнішнього діаметру

поршня d' та внутрішнього діаметру циліндра d'_c до зборки.

Врахувати шорсткість поверхні поршня та наявність газу в ущільненні при визначенні номінального контактного тиску σ_n можна, якщо визначати його з рівняння [6]:

$$2(\sigma_n - \sigma_f - p_1) + [(2 - \gamma)p_1 + \gamma p_2] \exp\left(-\frac{1,83\sigma_n}{Eq}\right) = 0, \quad (21)$$

де γ – коефіцієнт, що визначається за формулою [3, 6]:

$$\gamma = 1,4k_N / \sqrt[3]{b^2}, \quad (22)$$

причому розмірність величини b в цій формулі – мм;

k_N – коефіцієнт формули Новикова І.І. [3, 6], що враховує властивості матеріалу поршня-зразка;

E – зведений модуль Юнга контактуючої пари;

q – градієнт шорсткої поверхні;

p_1, p_2 – відповідно тиск газу перед та за ущільнюючим кільцем.

Складність перевірки існуючих формул натікання газу полягає в тому, що вони дають миттєву швидкість, величина якої міняється з часом, оскільки відбувається зміна тиску на виході ущільнюючого елементу. Цю проблему можна розв'язати, якщо розрахувати час, за який тиск газу в замкненій камері, в яку натікає газ, зростає з початкового значення p_a до кінцевого p_s .

Запишемо рівняння Клапейрона-Менделєєва для газу, що знаходиться в замкненій камері:

$$m = \frac{\mu W}{RT} p, \quad (23)$$

де m – маса газу;

μ – молярна маса газу;

W – об'єм камери;

R – молярна газова стала;

T – абсолютна температура газу;

p – тиск газу в камері.

З (23) отримаємо швидкість зміни маси газу в камері:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\mu W}{RT} \frac{dp}{dt}. \quad (24)$$

Крім того, швидкість зміни маси газу в камері може бути розрахована через натікання газу $Q(p)$:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\rho_0}{p_0} Q(p), \quad (25)$$

де ρ_0 – густина газу при нормальних умовах (тискові p_0).

Порівнявши (24) та (25), отримаємо:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT\rho_0}{\mu W p_0} Q(p). \quad (26)$$

Позначимо:

$$k_t = \frac{\mu W p_0}{RT\rho_0}. \quad (27)$$

Запишемо (27) наступним чином:

$$dt = \frac{k_t}{Q(p)} dp. \quad (28)$$

На підставі (28) визначимо час, за який тиск газу в замкненій камері зростає з початкового значення p_a до кінцевого p_s :

$$t = k_t \int_{p_a}^{p_s} \frac{dp}{Q(p)}. \quad (29)$$

Розрахунок тривалості натікання газу в циліндро-поршневого ущільненні виконується за допомогою програми Versuch [7], написаної з використанням програмного продукту Mathcad Professional. Розрахунок проводиться за наступним алгоритмом [7].

Задаються такі умови проведення експерименту.

1. Характеристики шорсткості поршня-зразка:

- середньоарифметичне відхилення точок профілю Ra ;
- градієнт поверхні q .
- 2. Модуль пружності поршня E_p .
- 3. Коефіцієнт Пуассона поршня μ_p .
- 4. Коефіцієнт формули Новикова І.І. [3, 6], що враховує властивості матеріалу поршня-зразка k_N .
- 5. Діаметральні розміри поршня:
 - зовнішній діаметр до зборки d' ;
 - внутрішній діаметр d_i .
- 6. Ширина ущільнюючої поверхні b .
- 7. Внутрішній діаметр циліндра до зборки d'_C .
- 8. Динамічна в'язкість газу η_B .
- 9. Молярна маса газу μ .
- 10. Ефективний діаметр молекули газу d_m .
- 11. Абсолютна температура газу T .
- 12. Густина газу при нормальних умовах ρ_0 .
- 13. Тиск газу при нормальних умовах p_0 .
- 14. Тиск газу всередині поршня-зразка p_h .
- 15. Тиск газу на вході ущільнюючого елемента p_e .
- 16. Об'єм камери W .
- 17. Початковий тиск газу в камері p_a .
- 18. Кінцевий тиск газу в камері p_s .
- 19. Фізичні константи:
 - молярна газова стала R ;
 - стала Больцмана k .

Розрахунок ведеться в наступній послідовності.

1. Спектральні моменти $m_0(Ra)$, $m_2(q)$ та питома площа шорсткої поверхні $S(q)$ [7].
2. Номінальний контактний тиск в ущільненні $\sigma_n(p, p_e, q)$ за формулами (20, 21).
3. Довжина вільного пробігу $\bar{\lambda}(p, p_e)$ та середня швидкість молекул газу V_g [7]. Середній тиск

газу в ущільненні визначається за формулою:

$$p_{cp}(p) = 0,5(p_e + p).$$

4. Еквівалентний діаметр щілинних каналів [7]:
 - еквівалентний діаметр $d_F(Ra, p, p_e, q)$, знайдений на підставі площі щілини;
 - еквівалентний діаметр $d_P(Ra, p, p_e, q)$, знайдений на підставі периметру щілини;
 - зведений еквівалентний діаметр $d_{екв}(Ra, p, p_e, q)$.
5. Величина натікання газу в ущільненні [7]:
 - для в'язкісного режиму $Q_B(Ra, p, p_e, q)$;
 - для молекулярного режиму $Q_M(Ra, p, p_e, q)$;
 - для перехідного режиму $Q_U(Ra, p, p_e, q)$;
 - для загального випадку (режим натікання газу в ущільненні визначається за критерієм Кнудсена

[8]) за формулою:

$$Q(Ra, p, p_e, q) = \begin{cases} Q_M(Ra, p, p_e, q), & k_r(Ra, p, p_e, q) > 1; \\ Q_B(Ra, p, p_e, q), & k_r(Ra, p, p_e, q) < 0,01; \\ Q_U(Ra, p, p_e, q), & 0,01 \leq k_r(Ra, p, p_e, q) \leq 1. \end{cases}$$

де

$$k_r(Ra, p, p_e, q) = \bar{\lambda}(p, p_e) / d_{екв}(Ra, p, p_e, q).$$

6. Тривалість натікання газу $t(Ra, q, p_e)$ розраховуємо за формулою (29).

Висновки

На основі теорії стохастичних процесів були розроблені методи розрахунку основних характеристик контакту спряжених поверхонь беззмашувальних циліндро-поршневих ущільнень.

Результатом є розробка інженерних методів розрахунку номінального контактного тиску та тривалості натікання газу в металополімерних циліндро-поршневих ущільненнях, що працюють без змащення.

Експериментальна перевірка розробленого інженерного методу визначення тривалості натікання газу $t(Ra, q, p_e)$ в ущільненні, що була проведена на 8 зразках, виготовлених з вініпласту, фторопласту 4, оргскла та флубону 20, засвідчила їх добру точність – розходження між розрахунком та експериментом знаходилось в межах від 3,07% до 18,76%.

Література

1. Francis H.A. Application of spherical indentation mechanics to reversible and irreversible contact between rough surfaces / H.A. Francis // *Wear.* – 1977. – V. 45. – N 2. – P. 221–269.
2. Nayak P.R. Random process model of rough surfaces in plastic contact / P.R. Nayak // *Wear.* – 1973. – V. 26. – P. 305–333.
3. Новиков И.И. Бесшмазочные поршневые уплотнения в компрессорах / Новиков И.И., Захаренко В.П., Ландо Б.С. – Л. : Машиностроение, 1981. – 238 с.
4. Semenjuk N.F. Entwicklung von Berechnungsverfahren der Reibungs- und Verschleißtheorie mit Hilfe des Modells stochastischer Felder: Diss. B an der Technischen Hochschule Zittau / Semenjuk N.F. – Zittau, 1991. – 160 s.
5. Сопротивление материалов / [Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л., Попков В.Г., Уманский Э.С.]. – К. : Техніка, 1967. – 792 с.
6. Соколан К.С. Розробка на основі теорії стохастичних процесів методу розрахунку коефіцієнту тертя ковзання беззмашувальних поршневих ущільнень : дис. ... канд. техн. наук / Соколан К.С. – Хмельницький, 2001. – 204 с.
7. Тимошук О.Г. Розробка методів розрахунку та експериментального дослідження герметичності беззмашувальних циліндро-поршневих ущільнень : дис. ... канд. техн. наук / Тимошук О.Г. – Хмельницький, 2003. – 386 с.
8. Макушкин А.П. Научно-технические основы создания полимерных уплотнений и узлов трения оборудования криогенных систем : дис. ... д-ра техн. наук / Макушкин А.П. – Балашиха, 1982. – 511 с.

Рецензія/Peer review : 23.11.2016 р.

Надрукована/Printed : 16.12.2016 р.

Стаття рецензована редакційною колегією