

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДІАЛЬНИХ ГАЗОВИХ ПІДВІСІВ З ПОЗДОВЖНИМИ КАНАВКАМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В статті досліджений радіальний газовий підвіс з поздовжніми канавками різної глибини та вплив канавок з різним профілем нахилу в напрямку течії газу на характеристики (радіальну жорсткість, піднімальну силу та витрати газу) підвісу. З'ясувалося, що з запропонованих форм поздовжніх канавок радіального газового підвісу, порівняно з підвісом з канавками сталої глибини з оптимальними конструктивними параметрами, є профілі нахилу канавок та східців, які збільшують безрозмірну радіальну жорсткість (відповідно на 54% та 20%). Запропонована методика розрахунку характеристик радіальних газових підвісів з поздовжніми канавками з використанням методів. Витрати газу через робочі зазори підвісів практично не залежать від профілю канавок.

Ключові слова: *радіальний газовий підвіс, поздовжні канавки різної глибини, східчасті канавки, трикутний профіль канавок, нахил в напрямку течії газу, радіальна жорсткість, витрати газу.*

Abstract

The article deals with a radial gas bearing with longitudinal grooves of different depths and the effect of grooves, with different incline profile in the direction of gas flow, on the characteristics (radial rigidity, lifting force and gas flow) of the bearing. It turned out that from the proposed forms of the longitudinal grooves of the radial gas bearing, in comparison with the bearing with grooves of constant depth with optimal design parameters, there are tilting profiles of grooves and steps that increase the dimensionless radial rigidity (by 54% and 20%, respectively). The method for calculating the characteristics of radial gas bearings with longitudinal grooves using the methods of splines proposed. The flow rate of gas through the working clearances of bearings is practically independent of the profile of the grooves.

Keywords: *radial gas bearing, longitudinal grooves of different depths, step grooves, triangular profile of grooves, inclination in the direction of gas flow, radial rigidity, gas flow.*

Вступ

Газові підвіси поділяються на два типи: з внутрішньою компенсацією (регулювання тиску в залежності від навантаження шляхом конструктивних елементів всередині робочого зазору) та опори з зовнішнім дроселем (зовнішня компенсація) у вигляді отворів, щілин, пористих вставок тощо. Опори з зовнішньою компенсацією мають значно вищу піднімальну силу, жорсткість та кращі економічні показники (витрати повітря при експлуатації) порівняно з опорами з внутрішньою компенсацією, особливо при $\lambda \leq 1$ (λ – відношення довжини опори до її діаметру). Але такі підвіси схильні до значної зміни своїх характеристик при експлуатації (засмічення отворів, щілин), високу чутливість до зміни вологості газу (повітря), що подається від зовнішнього джерела живлення. Підвіси з внутрішньою компенсацією більш технологічні в виробництві та не мають вказаних вище недоліків опор з зовнішньою компенсацією.

Для підвищення характеристик підвісів з поздовжніми канавками необхідно зменшити перетікання стиснутого газу по колу з зони підвищеного тиску в зону зниженого тиску.

Конструктивно це досягається виконанням поздовжніх канавок змінної глибини (рис. 1, а – д).

Основна частина

Газ (повітря) для роботи радіальної опори (рис. 1) під тиском P_H надходить безпосередньо в робочий зазор, протікає зони з поздовжніми канавками та зони без канавок (ізотропні) витікає в навколишнє середовище. При навантаженні на вал ортогонально до осі, вісь вала зміщується зі співвісного з корпусом положення радіально, тому для визначення статичних характеристик радіальної опори достатньо розглянути лише одну її половину, а отримані результати подвоїти. Для радіальних підвісів безрозмірна піднімальна сила F^* лінійно залежить від відносного

радіального ексцентриситету в межах $-0,5 \leq \varepsilon \leq 0,5$. Тому:
$$K_\varepsilon^* = \left(\frac{dF^*}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=0}, \quad F^* = K_\varepsilon^* \cdot \varepsilon,$$

де K_ε^* – безрозмірна радіальна жорсткість опори.

Характеристики радіальних опор з канавками сталої глибини (рис. 1, а) достатньо досліджені в статичному режимі при їх оптимальних параметрах.

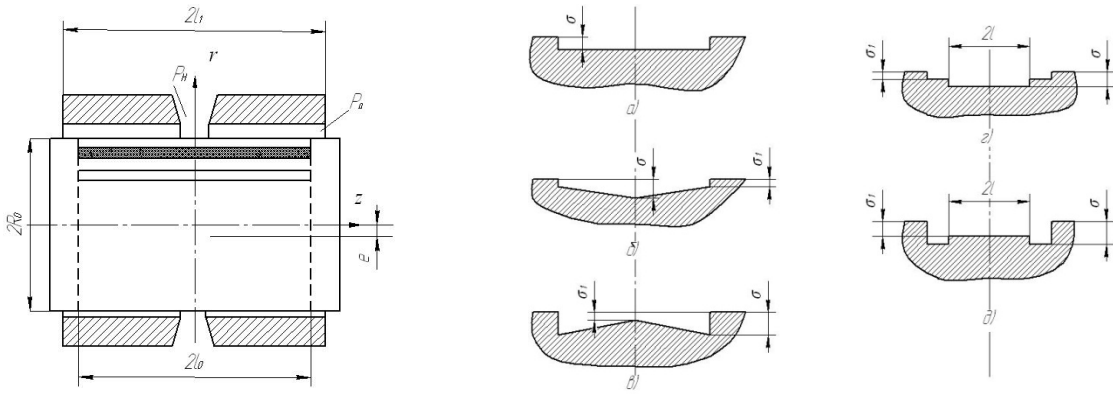


Рис. 1. Радіальна газова опора з поздовжніми канавкам різного профілю: а) постійна глибина; б) глибина зменшується в напрямку течії газу; в) глибина збільшується в напрямку течії газу; г) східчаста форма з більшою глибиною на вході в робочий зазор; д) східчаста форма з меншою глибиною на вході в робочий зазор.

Основні позначення: c – робочий зазор між валом і корпусом опори при їх співвісному положенні; $\varepsilon = e/c$ – відносний радіальний ексцентриситет; $\lambda = l_0/R_0$ – відносна довжина опори; $\zeta = z/l_0$ – безрозмірна осьова координата; σ, σ_1 – глибина поздовжніх канавок; $v = c/(c+\sigma)$, $v_1 = c/(c+\sigma_1)$ – параметр зміни зазору, внаслідок нанесення канавок; $\beta = \sigma/(c+\sigma_1)$ – параметр канавки змінної глибини; $\gamma = v+\beta$, $\gamma_1 = 1-\gamma$ – при збільшенні глибини канавок в напрямку течії газу (рис. 2, в); $\gamma = 1$ і $\gamma_1 = - (1-v-\beta)$ – у випадку зменшення глибини канавок в напрямку течії газу; φ_1, φ_2 – центральні кути канавки та виступу відповідно; $\alpha = \varphi_1/(\varphi_1 + \varphi_2)$ – відносна ширина канавок; $\alpha_1 = l/l_0$ – відносна довжина східця; $\alpha = l_1/l_0$ – відносна довжина канавок; p_a – тиск навколишнього середовища; p_H – тиск газу від зовнішнього джерела стиснутого газу (на вході в робочий зазор опори); $P_H = p_H/p_a$ – безрозмірний тиск газу, що подається в робочий зазор; $p = p(\zeta, \varphi)$ – тиск газу в робочих зазорах опори; $P = p/p_a$ – безрозмірний тиск; $u = P^2$ – квадрат безрозмірного тиску.

Якщо поздовжні канавки мають змінну глибину (рис. 1, б, в), то диференціальне рівняння розподілу тиску в профільованій зоні записується у вигляді:

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi^2} - \frac{3}{\beta_1 h_q} (v \beta_2 \cos \varphi - \gamma_1 \chi_0) \frac{\partial u_1}{\partial \xi} + \frac{v^3 \lambda^2 h^3}{\beta_2 \beta_3^2 (1-\chi)^2} \left[h \beta_3 \frac{\partial^2 u_1}{\partial \varphi^2} + \frac{3 \beta_4 \varepsilon}{h_q} \sin \varphi \frac{\partial u_1}{\partial \varphi} \right] = 0, \quad (1)$$

де $\chi = \varphi_2/(\varphi_1 + \varphi_2)$, $\chi_0 = \chi/(1-\chi)$, $h = h_v/h_q$, $h_q = \gamma - v \varepsilon \cos \varphi + \gamma_1 \cdot \xi$, $h_v = 1 - v \varepsilon \cos \varphi$,
 $\beta_1 = \chi_0 + v^3 \cdot h^3$, $\beta_2 = \chi_0 + v^2 \cdot h^2$, $\beta_3 = 1 + \chi_0 \cdot v^3 \cdot h^3$, $\beta_4 = 1 + \chi_0 \cdot v^4 \cdot h^4$.

При $\chi = 1$, $v = 1$, $\gamma = 1$, $\gamma_1 = 0$ з рівняння (1) отримуємо основне рівняння для гладеньких ділянок газового шару.

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} - \frac{3}{h_v} \cos \varphi \frac{\partial u}{\partial \xi} + \lambda^2 \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} + \frac{3}{h_v} \varepsilon \frac{\partial u_2}{\partial \varphi} \sin \varphi \right] = 0.$$

Безрозмірні квадрати тиску u_i в робочих зазорах радіальної опори (рис.1) знаходяться з використанням методами сплайнів та циклічної прогонки. Радіальну піднімальну силу F_ε та витрати газу Q знаходяться таким чином:

$$F_\varepsilon = 4R_0^2 P_a F_\varepsilon^*, \quad Q = \frac{\pi \rho P_a c^3}{12\mu} Q^*,$$

$$F_\varepsilon^* = \lambda \left(\int_0^\alpha d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_1} \cos \varphi d\varphi + \int_\alpha^1 d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_2} \cos \varphi d\varphi \right), \quad Q^* = \frac{1}{\pi \lambda} \left(\int_0^{2\pi} h_v^3 \frac{\partial u_1}{\partial \xi} d\varphi + \int_0^{2\pi} h_v^3 \frac{\partial u_2}{\partial \xi} d\varphi \right)$$

Недоліком опор з канавками змінної глибини є складність розрахунків та проведення оптимізації їх конструктивних параметрів.

Зменшити коллові перетікання газу в радіальній опорі (рис. 1) можна шляхом нанесення східчастих поздовжніх канавок (рис. 1, г, д).

Безрозмірна піднімальна сила F^* радіальної газової опори зі східчастими поздовжніми канавками.

$$F^* = \lambda \left(\int_0^{\alpha_1} d\xi \int_0^\pi \sqrt{U_1} \cos \varphi d\varphi + \int_{\alpha_1}^1 d\xi \int_0^\pi \sqrt{U_2} \cos \varphi d\varphi + \int_\alpha^1 d\xi \int_0^\pi \sqrt{U_3} \cos \varphi d\varphi \right)$$

$$\text{Безрозмірні витрати газу } Q^* \text{ знаходяться при } \varepsilon=0: \quad Q^* = \frac{\tau(P_H^2 - 1)}{\lambda(\alpha_2 v^3 - \tau(1-\alpha))}.$$

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати дослідження показали, що безрозмірні витрати газу Q^* через радіальну опору практично не залежать від профілю поздовжніх канавок (рис. 1, а – д). Якщо у опори глибина канавок збільшується в напрямку течії газу (рис. 1, в), то безрозмірна радіальна жорсткість її значно менша (в 1,75 рази при $\beta = 0$) порівняно з опорою із зворотнім нахилом канавок (рис. 1, б). Радіальна опора з мінімальною глибиною канавки на лінії наддування газу

(рис. 1, в) має екстремуми безрозмірної радіальної жорсткості по коефіцієнту глибини канавки β та параметру плавності зазору ν . У підвісі з канавками, що зображена на рис. 1, б, зон статичної нестійкості не виявлено при $0 \leq \beta \leq 1$ і $0,2 \leq \nu \leq 1$. Радіальна опора у якій глибина повздовжніх канавок збільшується в напрямку течії газу (рис. 1, в) втрачає статичну стійкість при $\beta \leq 0,25$ і $\nu \leq 0,35$.

При зафіксованому значенні відносної довжини канавки α для радіальної опори з поздовжніми канавками, глибина яких зменшується в напрямку течії газу, існують значення ν та β при яких безрозмірна жорсткість K_e^* радіальної опори досягає максимуму ($K_e^* = 1,884$), що значно більше (на 54%), ніж у опори з канавками постійної глибини, що має оптимальні значення безрозмірних конструктивних параметрів ν та β повздовжніх канавок (при максимумі функції $\Phi = K_e^*/Q^*$) [3].

Розрахунки радіальної опори зі східчастими канавками (рис. 1, г, д) показали, що якщо глибина поздовжньої канавки на вході у робочий зазор менша (при $0,4 \leq \alpha_l \leq \alpha$), то безрозмірна радіальна жорсткість починає зростати тільки при $\nu \geq 0,35$, у разі якщо глибина поздовжніх канавок в напрямку течії газу по робочому зазору зменшується, то опора буде працездатною вже при $\nu \geq 0,17$ ($\sigma \approx 4,9\text{-}c$) (рис. 1, г), тобто опора зі східчастими канавками (рис. 1, д) має зону нестійкості до $\nu = 0,35$.

При збільшенні лише відносної довжини східця α_l , без зміни глибини поздовжніх канавок, безрозмірна радіальна жорсткість опори зростає для профілю канавок, у яких глибина східця зменшується в напрямку течії газу (рис. 1, д), для профілю у якого на вході в робочий зазор глибина поздовжніх канавок менша (рис. 1, г), то при $\alpha_l \leq 0,45$ газова опора непрацездатна (зона нестійкості).

Радіальна газова опора зі східчастими поздовжніми канавками (рис. 1, д) має більшу безрозмірну радіальну жорсткість (на 20%) та відношення K_e^*/Q^* порівняно з опорою, у якій канавки сталої глибини і конструктивні параметри оптимальні (максимум K_e^*/Q^*).

ВИСНОВКИ

Витрати газу для роботи радіальної опори з поздовжніми канавками не залежать від профілю канавок при малих значення радіального ексцентриситету.

Опора з поздовжніми канавками глибина яких зменшується в напрямку течії газу має значно більшу радіальну піднімальну силу порівняно з опорами з канавками постійної глибини і з опорами з канавками з мінімальною глибиною в зоні подачі стиснутого газу.

Радіальні опори з східчастими поздовжніми канавками з більшою глибиною на вході в робочий зазор, на відміну від поздовжніх канавок з меншою глибиною на вході, працездатні в діапазоні практичного використання опор і мають більшу безрозмірну радіальну жорсткість і більш економічні порівняно з опорами з канавки сталої глибини.

В перспективі подальших досліджень планується провести оптимізацію конструктивних параметрів канавок глибина яких зменшується в напрямку течії газу та східчастих канавок з більшою глибиною в зоні подачі стиснутого газу в робочі зазори радіальних газових опор.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Емельянов А. В. Характеристики радиальных газостатических опор с двойным дросселированием газового потока / А. В. Емельянов, В. А. Федотов, В. А. Приятельчук // Машиноведение. – 1977. – № 2. – С. 97 – 104.
2. Федотов В. О. Газові підвіси шпindelьних вузлів : монографія / В. О. Федотов, І. В. Федотова. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 244 с.
3. Степанчук В. І. Лінійний статичний аналіз газостатичних конічних підвісок, профільованих поздовжніми канавками / В. І. Степанчук, В. О. Федотов // Вісник ВПІ. – 1994. – № 3 (4). – С. 57 – 61.
4. Федотов В. О. Вплив нахилу поздовжніх канавок на характеристики радіальних підвісок / В. О. Федотов, В. В. Савуляк // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2003. – № 1. – С. 62 – 66.
5. Самарский А. А. Разностные схемы / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
6. Віштак І. В. Вплив східчастих поздовжніх канавок на характеристики радіальних газостатичних опор / І. В. Віштак, В. О. Федотов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 5 (128). – С. 110 – 115.
7. Віштак І. В. Напрямки наукових досліджень для покращення характеристик радіальних газових опор з внутрішньою компенсацією/ І. В. Віштак, В. О. Федотов // Proceedings of the International Scientific Conference "Science of the XXI century: problems and prospects of researches" (August 17, 2017, Warsaw, Poland). – 2017. – Vol. 1. – С. 41-46.

Федотов Валерій Олександрович – канд. техн. наук, доцент кафедри Опору матеріалів та прикладної механіки, Вінницький національний технічний університет, тел.: (0432)-598-072, e-mail: fedotov_va@ukr.net

Віштак Інна Вікторівна – канд. техн. наук, старший викладач кафедри Безпеки життєдіяльності, Вінницький національний технічний університет, тел.: (097)-896-61-13, e-mail: innavish322@gmail.com

Гончарук Ліза Леонідівна, Вінницький національний технічний університет, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, e-mail : lizahoncharuk@gmail.com .

Fedotov Valeriy Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, Professor of Department of Strength of Materials and Applied Mechanics, the Vinnytsya National Technical University, (0432)-598-072, e-mail: fedotov_va@ukr.net

Vishtak Inna Viktorivna – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of Life Safety, the Vinnytsya National Technical University, tel.: (097)-896-61-13; e-mail: innavish322@gmail.com

Honcharuk Liza student of Heat and Gas Supply Department, Vinnytsya National Technical University. e-mail lizahoncharuk@gmail.com