

THE INTERNATIONAL  
SCIENTIFIC  
JOURNAL

# *Problems of Tribology*

# *Проблеми трибології*

МІЖНАРОДНИЙ  
НАУКОВИЙ  
ЖУРНАЛ

1' 2003

Федотов В.О.,  
Савуляк В.В.  
Вінницький державний  
технічний університет,  
м. Вінниця, Україна

## ВПЛИВ НАХИЛУ ПОВЗДОВЖНІХ КАНАВОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДІАЛЬНИХ ПІДВІСОК

Газові підвіси з поздовжніми канавками успішно працюють в шпindelних вузлах свердлильних, шліфувальних верстатів та технологічному обладнанні з обробки кристалів і каміння. Використання газових підвісів з канавками обумовлюється технологічністю їх виготовлення та високою надійністю в роботі. Але підвіси такого типу значно поступаються за своїми характеристиками опорам з регуляторами тиску поза несучого шару газу при відносній довжині опори  $\lambda \leq 3$  ( $\lambda$  - відношення довжини опори до діаметра вала). Для поліпшення характеристик підвісів з поздовжніми канавками необхідно зменшити витрати та шкідливі колові перетікання газу в робочому зазорі [1, 2]. У доповіді [3] та роботі [4] показано, що канавки змінної глибини та ширини можуть, в принципі, привести до збільшення радіальної підйомної сили, відновлюючого моменту при кутових переміщеннях вала та зменшення витрат газу.

У радіальному підвісі (рис.1) газ подається під тиском  $P_n$  безпосередньо в зазор між валом та втулкою і, протікаючи через ділянки 1, 3 з поздовжніми канавками та області 2,4 без канавок, витікає в навколишнє середовище. Вплив нахилу поздовжніх канавок постійної ширини на характеристики радіального підвісу розглянемо при компланарній неспіввісності вала та втулки. Якщо глибина канавки змінюється лінійно (рис.2), то зазор в канавці  $h_k$  та на виступі  $h_e$  запишеться:

$$h_k = c + \sigma_0 \xi, \quad h_e = ch_v$$

де  $h_v = \gamma - \nu \left( \epsilon + \theta \xi \right) \cos \varphi + \psi \xi$ ,  $h_v = 1 - \nu \left( \epsilon + \theta \xi \right) \cos \varphi$ ;  $c$  - зазор між валом і втулкою при їх співвісному

положенні;  $\sigma_0$  - максимальна глибина поздовжньої канавки;  $\xi = \frac{z}{l}$  - безрозмірна осьова координата;  $\varphi$  - координата, що відраховується від площини, що проходить через осі вала та втулки в області мінімального

зазору при  $e \neq 0$ ;  $\epsilon = \frac{e}{c}$  - відносне радіальне зміщення вала;  $\theta = \frac{e_1}{c}$  - відносне кутове зміщення вала;

$\nu = \frac{c}{c + \sigma_0}$  - параметр плавності зазору;  $\beta = \frac{\sigma}{c + \sigma_0}$  - параметр глибини канавки;  $\sigma$  - мінімальна глибина

поздовжньої канавки;  $\gamma = \nu + \beta$  та  $\psi = 1 - \gamma$  при збільшенні глибини канавки за течією газу (рис.2 а);  $\gamma = 1$  та

$\psi = -(1 - \nu - \beta)$  при зменшенні глибини канавки за течією газу (рис.2 б).

Диференціальне рівняння розподілу тиску в мастильному шарі профільованому поздовжніми канавками отримаємо за методом, що приведений в роботах [5,6].

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} - \frac{3}{\beta_1 h_q} \left( \nu \beta_2 \cos \varphi - \psi \chi_0 \right) \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\nu^3 \lambda^2 h^3}{\beta_2 \beta_3^2 \left( \epsilon + \theta \xi \right)} \left[ h \beta_3 \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{3 \beta_4 \left( \epsilon + \theta \xi \right)}{h_q} \sin \varphi \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right] = 0, \quad (1)$$

Вплив нахилу поздовжніх канавок на характеристики радіальних підвісок

де  $\chi = \frac{\varphi_1}{\varphi_1 + \varphi_2}$ ,  $\chi_0 = \frac{\chi}{1 - \chi}$ ,  $h = \frac{h_v}{h_q}$ ,  $u = \frac{P^2}{P_a^2}$ ,  $P$  - тиск в газовому шарі;  $P_a$  - тиск в середовищі, де знаходиться

підвіс,  $\beta_1 = \chi_0 + \nu^3 h^3$ ,  $\beta_2 = \chi_0 + \nu^2 h^2$ ,  $\beta_3 = 1 + \chi_0 \nu^3 h^3$ ,  $\beta_4 = 1 + \chi_0 \nu^4 h^4$ .

При  $\chi = 0$ ,  $\nu = 1$ ,  $\gamma = 1$ ,  $\psi = 0$  із рівняння (1) отримуємо основне рівняння для гладеньких ділянок газового шару.

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

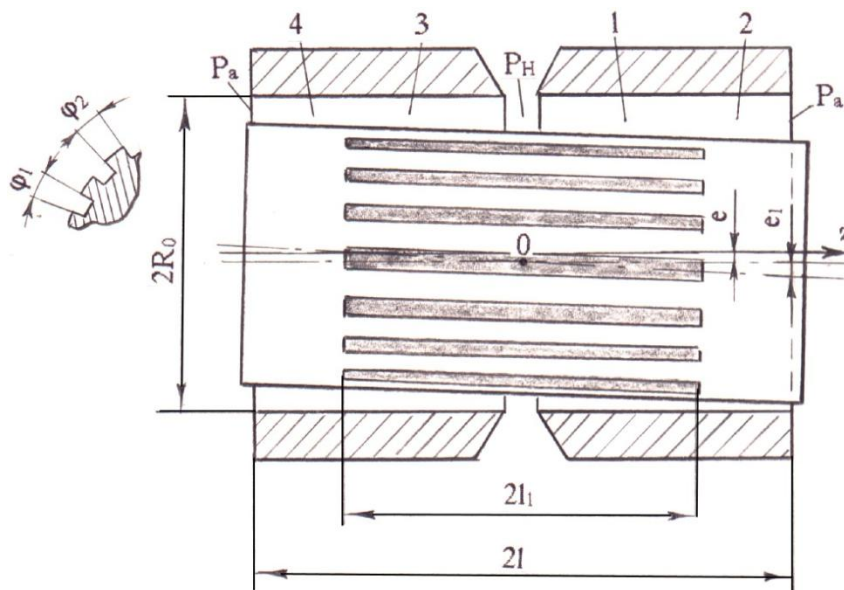


Рис.1 Радіальний підвіс з поздовжніми канавками постійної ширини

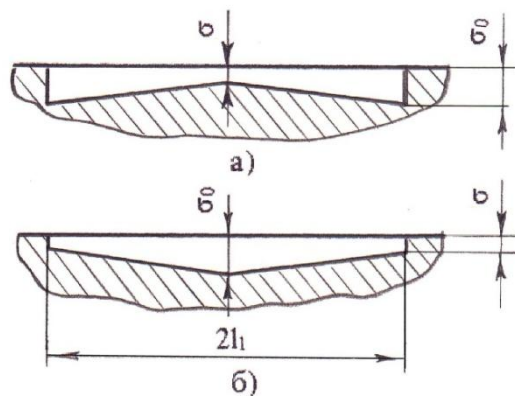


Рис.2. Профіль поздовжніх канавок (глибина канавки збільшується а) та зменшується б) по ходу течії газу за лінійним законом)

Для визначення безрозмірного квадрату тиску газу  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ,  $u_4$  в робочому зазорі газового підвісу відповідно на ділянках 1-4 (рис.1) використовувався метод сплайнів [7,8] та метод циклічної прогонки [9]. Знаючи розподіл тиску газу в робочому шарі підвіски, знаходимо підйомну радіальну силу  $F$ , відновлюючий момент  $M$  при кутових зміщеннях вала та витрати газу  $Q$  [1,4].

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

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

де

$$F_{\varepsilon}^* = \frac{\lambda}{2} \left( \int_0^{\alpha} d\xi \int_0^{\pi} \sqrt{u_1} \cos \varphi d\varphi + \int_{\alpha}^1 d\xi \int_0^{\pi} \sqrt{u_2} \cos \varphi d\varphi + \int_0^{-\alpha} d\xi \int_0^{\pi} \sqrt{u_3} \cos \varphi d\varphi + \int_{-\alpha}^0 d\xi \int_0^{\pi} \sqrt{u_3} \cos \varphi d\varphi + \int_{-\alpha}^{-1} d\xi \int_0^{\pi} \sqrt{u_1} \cos \varphi d\varphi \right)$$

$$M^* = 0.5\lambda^2 \left( \int_0^{\alpha} \xi d\xi \int_0^{\pi} \sqrt{u_1} \cos \varphi d\varphi + \int_{\alpha}^1 \xi d\xi \int_0^{\pi} \sqrt{u_2} \cos \varphi d\varphi + \int_0^{-\alpha} \xi d\xi \int_0^{\pi} \sqrt{u_3} \cos \varphi d\varphi + \int_{-\alpha}^{-1} \xi d\xi \int_0^{\pi} \sqrt{u_4} \cos \varphi d\varphi \right), \quad Q^* = \frac{1}{\pi l} \left( \int_0^{2\pi} h_v^3 \frac{\partial u_1}{\partial \xi} d\varphi + \int_0^{2\pi} h_v^3 \frac{\partial u_4}{\partial \xi} d\varphi \right),$$

$\alpha = \frac{l_1}{l}$  - відносна довжина поздовжньої канавки.

Дослідження показали, що безрозмірні витрати газу  $Q^*$  через радіальний підвіс не залежать від напрямку нахилу поздовжніх канавок (рис.2) та, як і у опор з канавками постійної глибини [1,6], залежність безрозмірної підйомної сили  $F^*$  та відновлюючого моменту  $M^*$  від відносного радіального  $\varepsilon$  та кутового  $\theta$  зміщення вала є лінійною до  $\varepsilon = \theta \leq 0,4$ . У підвісів із збільшенням глибини канавок по ходу течії газу (рис.2 а) безрозмірна радіальна жорсткість  $K_{\varepsilon\varepsilon}^* = \partial F^* / \partial \varepsilon$  значно менше (в 1,75 рази при  $\beta = 0$ , рис.3), а кутова жорсткість  $K_{\theta\theta}^* = \partial M^* / \partial \theta$  більше (в 1,2 рази при  $\beta = 0$ , рис.3) у порівнянні з підвісом із зворотнім нахилом канавок (рис.2 б). Радіальна опора (рис.1) з мінімальною глибиною канавки на лінії надуву газу має екстремуми безрозмірної радіальної жорсткості по коефіцієнту глибини канавки  $\beta$  (рис.3) та параметру плавності зазору  $\nu$  (рис.4). За критеріями [10] у підвісу з канавками, що зображені на рис.2 б, зон статичної нестійкості не виявлено при  $0 \leq \beta \leq 1$  і  $0,2 \leq \nu \leq 1$ . Радіальний підвіс у якого глибина поздовжніх канавок збільшується по ходу течії газу (рис.2 а) втрачає статичну стійкість при  $\beta \leq 0,25$  і  $\nu \leq 0,35$ . Таким чином, радіальний підвіс з поздовжніми канавками, глибина яких зменшується по ходу течії газу, має значні переваги у порівнянні з підвісом з канавками, що зображені на рис.2 а. Виключеннями можуть бути шпindelьні вузли з одним радіальним підвісом або з підвищеними вимогами до кутової жорсткості вузла.

У підвісу з максимальною глибиною канавки на лінії надуву безрозмірні жорсткості  $K_{\varepsilon\theta}^* = \partial F^* / \partial \theta$  та  $K_{\theta\varepsilon}^* = \partial M^* / \partial \varepsilon$  дорівнюють нулю при  $\varepsilon = \theta \leq 0,4$ . Витрати газу через такий підвіс із збільшенням  $\theta$  майже не збільшується (рис.5), а при радіальному навантаженні ( $\varepsilon \neq 0$ ) збільшується на 12% (рис.5) при  $\varepsilon = 0,4$  у порівнянні із співвісним розташуванням вала та втулки. Як видно із таблиці 1, при зафіксованому значенні відносної довжини канавки  $\alpha$ , існують значення  $\nu$  та  $\beta$  при яких безрозмірна жорсткість  $K_{\varepsilon\varepsilon}^*$  радіального підвісу досягає максимуму ( $K_{\varepsilon\varepsilon}^* = 1,884$ ), що значно більше (на 54%), ніж у опори з канавками постійної глибини, що має оптимальні значення безрозмірних конструктивних параметрів  $\nu$  та  $\beta$  поздовжніх канавок (при максимумі функції  $\Phi = K_{\varepsilon\varepsilon}^* / Q^*$ ) [1]. При оптимальних значеннях конструктивних параметрів і кутова жорсткість радіального підвісу з канавками, що зображені на рис.2 б, на 43% більше (табл.1) у порівнянні з опорою, профільованою канавками постійної глибини.

Вплив нахилу поздовжніх канавок на характеристики радіальних підвісок

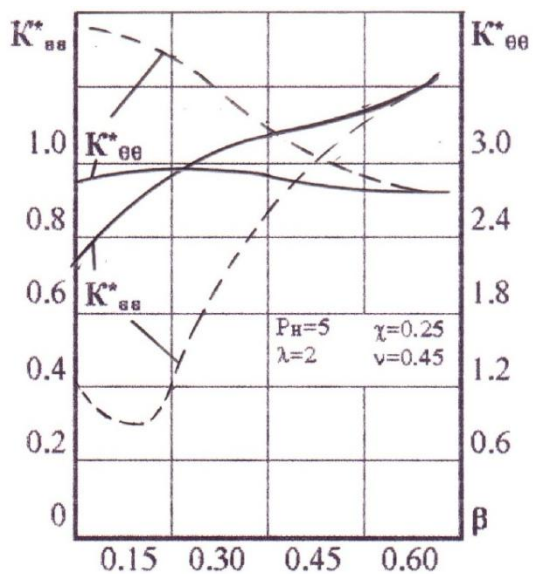


Рис.3. Залежність безрозмірної радіальної  $K_{\rho\rho}^*$  та кутової  $K_{\theta\theta}^*$  жорсткості радіального підвісу від коефіцієнта глибини  $\beta$  поздовжніх канавок ( - глибина канавок зменшується за ходом течії газу; --- глибина канавок збільшується за ходом течії газу).

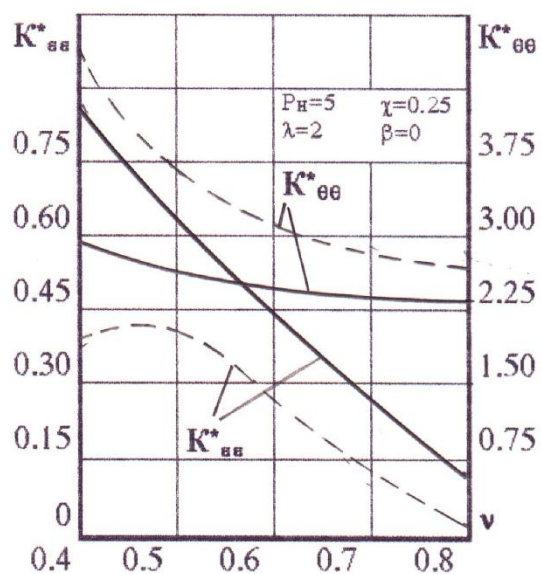


Рис. 4 Залежність безрозмірної радіальної  $K_{\rho\rho}^*$  та кутової  $K_{\theta\theta}^*$  жорсткості радіального підвісу від параметра плавності зазору ( - глибина канавок зменшується за ходом течії газу; --- глибина канавок збільшується за ходом течії газу).

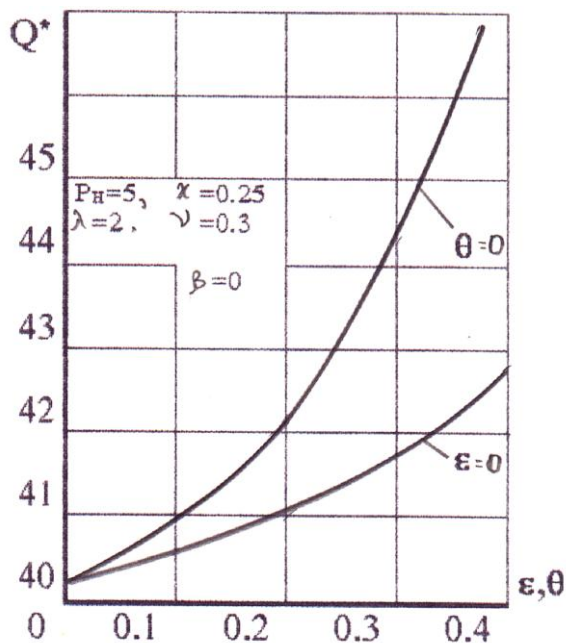


Рис.5. Залежність безрозмірних витрат газу  $Q^*$  від відносного радіального  $\epsilon$  та кутового  $\theta$  зміщень вала для підвісу з поздовжніми канавками глибина яких зменшується по ходу течії газу

Конструктивні параметри і відповідні їм характеристики радіального підвісу з поздовжніми канавками, глибина яких зменшується по ходу течії газу					
$P_n=5; \lambda=2; \varkappa=0,25; \alpha=0,676$					
$\nu$	$\beta$	$K_{\varepsilon\varepsilon}^*$	$K_{\theta\theta}^*$	$Q^*$	$\Phi$
0,29	0	1,635	3,926	41,6	0,039
0,312	0,062	1,884	3,929	44,5	0,042
0,333	0,133	1,691	3,524	45,6	0,037
0,357	0,214	1,41	3,074	45,8	0,031
0,385	0,308	1,245	2,785	45,7	0,027
0,417	0,417	1,204	2,682	45,8	0,026
Канавки постійної глибини і ширини					
0,454	0,546	1,221	2,739	46	0,026

## Література

- Емельянов А.В. и др. Характеристики радиальных газостатических опор с двойным дросселированием газового потока //Машиноведение.-1977.-№2. –с.97-104.
- Федотов В.А., Шевченко А.В., Молчанов А.В. Влияние окружных потоков газа в проточных каналах цилиндрического подвеса на его характеристики// Известия Вузов, Машиностроение., 1980.-№4.-с.67-71.
- Федотов В.А. Об улучшении характеристик газовых подвесов с продольными канавками// Тезисы докладов Всесоюзного научно-координационного совещания. Газовая смазка в машинах и приборах. М., АН СССР, ИМАШ, 1989.-с.86-87.
- Степанчук В.І., Федотов В.О. Лінійний статистичний аналіз газостатичних конічних підвісок профільованих поздовжніми канавками//Вісник ВПІ. –1994. -№3(4).-с.57-61.
- Хирс. Конструирование опорных подшипников с продольными канавками и внешним нагнетанием смазки// Проблемы трения и смазки. –1968.-№4.-с.324-331.
- Приятельчук В.А. Расчет характеристик газостатических подвесов с учетом сложной несоосности//Трение и износ. –т.6.-с.604-611.
- Емельянов А.В., Шевчук А.И. Метод корректирующих сплайнов и его приложение к теории газовых подвесов//В сб.: Исследование и приложение опор скольжения с газовой смазкой. Тезисы докладов на Всесоюзном координационном совещании: АН СССР.-Винница. –1983.-с.47-48.
- Степанчук В.И. и др. Применение метода сплайнов к расчету газовых подвесов/// В сб.: Совершенствование методики преподавания и научной работы по теоретической и прикладной механике в условиях перестройки высшей школы. Тезисы докладов XIV межвузовского научно-технического семинара: ХТИБО. –Хмельницкий. 1988.-с.101-102.
- Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука. 1977. – 656с.
- Шнайдер А.Г., Степанчук В.И. Статические характеристики конического газового смазочного слоя радиально-упорных моторподшипников и повышение их экономичности по расходу газа//Трение и износ. –т.13. -1992. -№3. –с.431-437.