

Чернець М.В.,* **

Жидик В.Б.*

* Дрогобицький державний педагогічний університет ім. Івана Франка,

** Люблінський політехнічний інститут

E-mail: chernets@drohobych.net

**УЗАГАЛЬНЕНА КУМУЛЯЦІЙНА
МОДЕЛЬ КІНЕТИКИ ЗНОШУВАННЯ
ПІДШИПНИКА КОВЗАННЯ.
ЧАСТИНА 2. УЗАГАЛЬНЕНА
КУМУЛЯЦІЙНА МОДЕЛЬ**

УДК 539.538:539.3

Подано узагальнену кумуляційну модель кінетики зношування елементів підшипника ковзання у випадку реалізації одно – дво –однообластєвого контакту, який виступає в різних фазах обертання вала з малою овальністю контуру у втулці з коловим контуром. У результаті числового розв'язку задачі встановлено закономірності зміни початкового максимального контактного тиску при обертанні вала та його зміни внаслідок зношування, довговічності підшипника та лінійне зношування втулки і вала у залежності від величини овальності. Контактні тиски є суттєво більшими у зонах двообластєвого контакту, ніж у зонах однообластєвого. Овальність вала збільшує довговічність підшипника та знижує зношування втулки. Результати подано графічно.

Вступ

З використанням моделі дослідження кінетики зношування при терті ковзання [1] та трибокінетичної кумуляційної моделі зношування, яка дозволяє враховувати збурення форми контурів обох деталей підшипника [2 - 4], подано розроблену узагальнену кумуляційну модель для випадку змішаного (одно-дво-однообластєвого) контакту.

1. Узагальнена кумуляційна модель зношування (одно - дво - однообластєва трибоконтактна взаємодія)

Цей випадок контакту і трибоконтакту розділяється як за видом співдотику, так і характером взаємодії співдотичних контурів тіл на окремі не взаємопов'язані фази – однообластєвої і двообластєвої взаємодії. Для детального аналізу розглянемо підшипник ковзання, у якому вал має овальність (рис. 1), а втулка є коловою. Тоді $D_2 = 1 - 3\cos 2\alpha_2$, $D_1 = 1$.

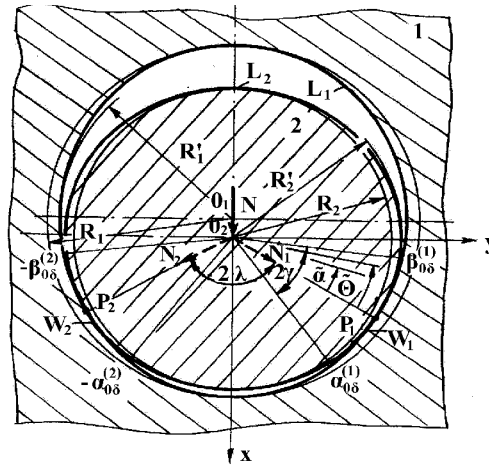


Рис. 1 – Розрахункова схема підшипника ковзання з овальністю вала та коловою втулкою

У залежності від значень величин ϵ та δ_2 буде виступати однообластєвий чи змішаний (одно-дво-однообластєвий контакт). Загальною умовою, що визначає перехід однообластєвого контакту у дво-областєвий є умова, що $\Sigma_{\delta} = 1 - (\delta_2 / 2\epsilon) D_2(\alpha_2) = 0$. Для вала з овальністю у випадку змішаного контакту буде 5 фаз взаємодії з втулкою (рис. 2). Розглянемо кожну з них.

Фаза I (т. P_1 – однообластєвий симетричний і несиметричний контакт):

- $\alpha_2^{(I)} = 0, 10^\circ, \dots, \alpha_{2^{**}1}^{(I)}$,
- $\alpha_{2^{**}1}^{(I)}$ з умови $\Sigma_{\delta}^{(I)} = 0$;

- півкути контакту $\alpha_{0\delta}(\alpha_2)$ з умови:

$$N = 4\pi R_2 E_\delta \varepsilon_\delta \sin^2 \frac{\alpha_{0\delta}(\alpha_2)}{4}; \quad (1)$$

- півкути трибоконтакту $\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)$ з умови:

$$N = 4\pi R_2 (E_\delta \varepsilon_\delta + E_h \varepsilon_h) \sin^2 \frac{\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)}{4}; \quad (2)$$

- максимальні трибоконтактні тиски:

$$\text{- 1-ий оберт: } p_{11}(\alpha_2, \delta, h) = p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^j p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}), \quad (3)$$

$$\text{- } n_2 \text{ обертів: } p_{11}(\alpha_2, n_2, \delta, h) = p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^{jn_2} p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \\ + \sum_1^{jn_2} p_{23}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{15}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}); \quad (4)$$

де індекси при p мають наступний зміст: 1-й – точка, 2-й – фаза;

- вал 2 зношуватиметься по контуру в діапазоні $\alpha_2^{(I)}$, а втулка 1 максимально при $\alpha = \alpha_1 = 0$;

- їх лінійне зношування обчислюється:

- за один оберт:

$$h_1^{(I)} = \sum_1^j \bar{h}_{1|\alpha_1=0}^{(I)} \quad (\text{в точці } \alpha = 0), h_{2\alpha_2}^{(I)} = \bar{h}_{2\alpha_2}^{(I)} \quad (\text{в точках } \alpha_2 = 0, \Delta\alpha_2, 2\Delta\alpha_2, \dots, 360^\circ); \quad (5)$$

- за n_2 обертів:

$$h_1^{(n_2)} = \sum_1^{jn_2} \bar{h}_{1|\alpha_1=0}^{(n_2)}, h_{2\alpha_2}^{(n_2)} = \sum_1^{jn_2} \bar{h}_{2\alpha_2}^{(n_2)}; \quad (6)$$

- при $\alpha_{2**1}^{(I)} p_{\min} = 0, 6N/R$.

Фаза II (т. P'_1 – несиметричний і симетричний двообластевий контакт):

- $\alpha_2^{(II)} = \alpha_{2*1}^{(II)}, \dots, 90^\circ, \dots, \alpha_{2**1}^{(II)}$,

$$\alpha_{2*1}^{(II)} = \alpha_{2**1}^{(I)}, \alpha_{2**1}^{(II)} \text{ з умови } \Sigma_\delta^{(II)} = 0;$$

- півкути контакту $\gamma_1(\alpha_2)$ з умови:

$$N_1 \neq N_2 = 4\pi R_2 E_\delta \varepsilon_\delta \sin^2 \frac{\gamma_k(\alpha_2)}{4}, \quad (7)$$

де

$$N_{1\alpha_2} = \frac{\sin(90^\circ + \lambda - \alpha_2)}{\sin(180^\circ - 2\lambda)}; \quad (8)$$

- півкути трибоконтакту $\gamma_{1\delta h}(\alpha_2)$ з умови:

$$N_1(N_2) = 4\pi R_2 (E_\delta \varepsilon_\delta + E_h \varepsilon_h) \sin^2 \frac{\gamma_{k\delta h}(\alpha_2)}{4}; \quad (9)$$

- максимальні трибоконтактні тиски:

$$\text{- 1-ий оберт: } p_{12}(\alpha_2, \delta, h) = p_{12}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^j p_{12}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}), \quad (10)$$

$$\text{- } n_2 \text{ обертів: } p_{12}(\alpha_2, n_2, \delta, h) = p_{12}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \\ + \sum_1^{jn_2} p_{12}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{24}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}); \quad (11)$$

• вал 2 зношуватиметься в точці P_1' $\alpha = \lambda$, що складає з вертикальною віссю Ox , відповідно, кут $\lambda_1 = \arcsin[\alpha_2 - (90^\circ - \lambda)]$; втулка 1 зношуватиметься в діапазоні $\alpha_2^{(II)}$; $D_2 = 1 + 3 \cos 2\alpha$;

• їх лінійне зношування обчислюється так:

- 1-ий оберт:
$$h_{1\alpha}^{(1)} = \bar{h}_{1\alpha}^{(1)}, h_{2\alpha}^{(1)} = \sum_1^j \bar{h}_{2\alpha}^{(1)}, \quad (12)$$

- n_2 обертів:
$$h_{1\alpha}^{(n_2)} = \sum_1^{n_2} \bar{h}_{1\alpha}^{(n_2)}, h_{2\alpha}^{(n_2)} = \sum_1^{j n_2} \bar{h}_{2\alpha}^{(n_2)}; \quad (13)$$

• при $\alpha_{2*1}^{(II)}$ та $\alpha_{2*1}^{(II)}$ $p_{\min} = 0,6N/R$.

Фаза II₂ (т. P_2' – несиметричний і симетричний двообластевий контакт):

• $\alpha_2^{(II)} = \alpha_{2*2}^{(II)}, \dots, 90^\circ, \dots, \alpha_{2*2}^{(II)}$,

$$\alpha_{2*2}^{(II)} = \alpha_{2*1}^{(II)} - 2\lambda, \alpha_{2*2}^{(II)} = \alpha_{2*1}^{(II)} - 2\lambda;$$

• півкути контакту $\gamma_2(\alpha_2)$ згідно умови (7),

де
$$N_{2\alpha_2} = \frac{\sin(-90^\circ + \lambda + \alpha_2)}{\sin(180^\circ - 2\lambda)}; \quad (14)$$

• півкути трибоконтакту $\gamma_{2\delta h}(\alpha_2)$ згідно умови:

$$N_1(N_2) = 4\pi R_2 (E_\delta \varepsilon_\delta + E_h \varepsilon_h) \sin^2 \frac{\gamma_{k\delta h}(\alpha_2)}{4}; \quad (15)$$

• максимальні трибоконтактні тиски:

-1-ий оберт:
$$p_{22}(\alpha_2, \delta, h) = p_{22}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^j p_{22}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}), \quad (16)$$

- n_2 обертів:
$$p_{22}(\alpha_2, n_2, \delta, h) = p_{22}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^{j n_2} p_{22}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{j n_2} p_{14}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}); \quad (17)$$

• вал 2 зношуватиметься в точці P_2 при $\alpha = -\lambda$, що складає з вертикальною віссю Ox , відповідно, кут $\lambda_2 = \arcsin[\alpha_2 - (90^\circ + \lambda)]$; втулка 1 зношуватиметься по контуру в діапазоні $\alpha_2^{(III)}$;

• їх лінійне зношування обчислюється як і попередньо;

• при $\alpha_{2*2}^{(III)}$ та $\alpha_{2*2}^{(III)}$ $p_{\min} = 0,6N/R$.

Фаза III (т. P_2 – однообластевий симетричний і несиметричний контакт):

• $\alpha_2^{(III)} = \alpha_{2*2}^{(III)}, \dots, 180^\circ, \dots, \alpha_{2*2}^{(III)}$,

$$\alpha_{2*2}^{(III)} = \alpha_{2*1}^{(II)}, \alpha_{2*2}^{(III)} \text{ з умови } \Sigma_\delta^{(III)} = 0;$$

• півкути контакту $\alpha_{0\delta}(\alpha_2)$ згідно умови (10),

півкути трибоконтакту $\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)$ згідно умови (2);

• максимальні трибоконтактні тиски:

-1-ий оберт:
$$p_{23}(\alpha_2, \delta, h) = p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^j p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}) + \sum_1^j p_{23}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}), \quad (18)$$

- n_2 обертів:
$$p_{23}(\alpha_2, n_2, \delta, h) = p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^{j n_2} p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{j n_2} p_{23}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{j n_2} p_{15}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}); \quad (19)$$

• вал 2 зношуватиметься по контуру в діапазоні $\alpha_2^{(III)}$, а втулка 1 – максимально при $\alpha = \alpha_1 = 0$;

• лінійне зношування обчислюється за один оберт згідно (5), а за n_2 обертів – згідно (6).

Фаза IV₂ (P_2'' – несиметричний і симетричний двообластевий контакт):

• $\alpha_2^{(IV)} = \alpha_{2*2}^{(IV)}, \dots, 270^\circ, \dots, \alpha_{2**2}^{(IV)}$,

$\alpha_{2*2}^{(IV)} = \alpha_{2**2}^{(III)}$, $\alpha_{2**2}^{(IV)}$ з умови $\sum_{\delta}^{(IV)} = 0$;

• півкути контакту $\gamma_2(\alpha_2)$ згідно умови 7), де $N_{2\alpha_2}$ за (14),

півкути трибоконтакту $\gamma_{2\delta h}(\alpha_2)$ згідно умови (9);

• максимальні трибоконтактні тиски:

$$\text{- 1-ий оберт: } p_{24}(\alpha_2, \delta, h) = p_{12}(\alpha_2, \delta, h) + \sum_1^j p_{24}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}), \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{- } n_2 \text{ обертів: } p_{24}(\alpha_2, n_2, \delta, h) &= p_{12}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \\ &+ \sum_1^{jn_2} p_{12}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{24}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}); \end{aligned} \quad (21)$$

• вал 2 зношуватиметься в точці P_2'' при $\alpha = \lambda$; втулка 1 зношуватиметься по контуру в діапазоні $\alpha_2^{(IV)}$;

• їх лінійне зношування обчислюється згідно (12), (13);

• при $\alpha_{2*2}^{(IV)}$ та $\alpha_{2**2}^{(IV)}$ $p_{\min} = 0,6N/R$.

Фаза IV₁ (m, P_1'' – несиметричний і симетричний двообластевий контакт):

• $\alpha_2^{(IV)} = \alpha_{2*1}^{(IV)}, \dots, 270^\circ, \dots, \alpha_{2**1}^{(IV)}$,

$\alpha_{2*1}^{(IV)} = \alpha_{2**2}^{(IV)} - 2\lambda$, $\alpha_{2**1}^{(IV)}$ з умови $\sum_{\delta}^{(IV)} = 0$;

• півкути контакту $\gamma_1(\alpha_2)$ згідно умови (7), де $N_{1\alpha_2}$ за (8),

півкути трибоконтакту $\gamma_{1\delta h}(\alpha_2)$ згідно умови (9);

• максимальні трибоконтактні тиски:

$$\text{- 1-ий оберт: } p_{14}(\alpha_2, \delta, h) = p_{22}(\alpha_2, \delta, h) + \sum_1^j p_{14}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}), \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{- } n_2 \text{ обертів: } p_{14}(\alpha_2, n_2, \delta, h) &= p_{22}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \\ &+ \sum_1^{jn_2} p_{22}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{14}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}); \end{aligned} \quad (23)$$

• вал 2 зношуватиметься в точці P_1'' при $\alpha = -\lambda$; втулка 1 зношуватиметься по контуру в діапазоні $\alpha_2^{(IV)}$;

• їх лінійне зношування обчислюється як попередньо.

Фаза V (m, P_1 – однообластевий симетричний і несиметричний контакт):

• $\alpha_2^{(V)} = \alpha_{2*1}^{(V)}, \dots, 360^\circ$,

$\alpha_{2*1}^{(V)} = \alpha_{2**1}^{(IV)}$ або з умови $\sum_{\delta}^{(V)} = 0$;

• півкути контакту $\alpha_{0\delta}(\alpha_2)$ згідно умови (1),

півкути трибоконтакту $\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)$ згідно умови (2);

- максимальні трибоконтактні тиски:

$$\begin{aligned}
 - 1\text{-ий обергт: } p_{15}(\alpha_2, \delta, h) &= p_{11}(\alpha_2, \delta, h) + \sum_1^j p_{23}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}) + \\
 &+ \sum_1^j p_{15}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}) = p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \\
 &+ \sum_1^{jn_2} p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}) + \sum_1^j p_{23}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}) + \sum_1^j p_{15}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}),
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
 - n_2 \text{ обергтів: } p_{15}(\alpha_2, n_2, \delta, h) &= p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \\
 &+ \sum_1^{jn_2} p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{23}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{15}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1});
 \end{aligned} \tag{25}$$

- вал 2 зношуватиметься по контуру в діапазоні $\alpha_2^{(V)}$, а втулка 1 – максимально при $\alpha = \alpha_1 = 0$;

- лінійне зношування обчислюється за (5), (6).

- при $\alpha_{2*1}^{(V)}$ $p_{\min} = 0, 6N / R$.

Сумарне лінійне зношування втулки і вала:

а) однообластевий контакт:

- втулка:

$$h_{1|\alpha=0}^{(n_2)} = h_1^{(I)} + h_1^{(III)} + h_1^{(V)} = \sum_j^{jn_2} \bar{h}_{1|\alpha=0}^{(n_2)}; \tag{26}$$

- вал:

$$h_{2\alpha_2}^{(n_2)} = h_{2\alpha_2}^{(I)}; h_{2\alpha_2}^{(III)}; h_{2\alpha_2}^{(V)} = \sum_1^{n_2} \bar{h}_{2\alpha_2}^{(n_2)} \text{ – по контуру, відповідно, в зонах } \alpha_2^{(I)}, \alpha_2^{(III)}, \alpha_2^{(V)}; \tag{27}$$

б) двообластевий контакт:

- втулка:

$$h_{1\alpha}^{(n_2)} = h_1^{(II)} + h_1^{(IV)} \quad [\text{т. } P_1' \text{ (зона } \alpha_2^{(II)}) + \text{т. } P_2'' \text{ (зона } \alpha_2^{(IV)})], \tag{28}$$

$$h_{1\alpha}^{(n_2)} = h_1^{(II)} + h_1^{(IV)} \quad [\text{т. } P_2' \text{ (зона } \alpha_2^{(II)}) + \text{т. } P_1'' \text{ (зона } \alpha_2^{(IV)})], \tag{29}$$

- вал:

$$h_{2\alpha}^{(n_2)} = h_2^{(II)} + h_2^{(IV)} \quad [\text{т. } P_1'(\lambda_1) + \text{т. } P_2''(\lambda_2)], \tag{30}$$

$$h_{2\alpha}^{(n_2)} = h_2^{(II)} + h_2^{(IV)} \quad [\text{т. } P_2'(-\lambda_2) + \text{т. } P_1''(-\lambda_1)]; \tag{31}$$

Розв'язок задачі за кумуляційною моделлю при наявності овальності вала підшипника проведено для наступних вихідних даних: $N = 0,1$ МН; $R = 0,05$ м; $v = 0,1256$ м/с; $f = 0,04$; $\varepsilon = 4,1 \cdot 10^{-4}$ м; $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = (0; 1; 2; 3; 4) \cdot 10^{-4}$ м; $\delta_1 + \delta_2 \leq \varepsilon$, $\delta_2 \leq \delta_1$; $\Delta\alpha_2 = 15^\circ$; $\bar{n}_2 = 12$ об /хв; $h_{1*} = 0,3$ мм; $\Sigma_1 = -(1 - h_1')$, $E_1 = 1,1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_1 = 0,34$ (бронза ОЦС 5-5-5); $E_2 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_2 = 0,3$ (сталь 35, гартування + високий відпуск); $B_1 = 4,75 \cdot 10^9$, $m_1 = 0,85$, $\tau_{10} = 0,1$ МПа; $B_2 = 5,46 \cdot 10^9$, $m_2 = 0,66$, $\tau_{20} = 0,08$ МПа.

Результати обчислень подано на рис. 2 - 7.

Зокрема на рис. 2 для $\varepsilon = 0,41$ мм та $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 0,4$ мм подано для випадку змішаного (одно-дво-однообластєвого контакту) залежність початкових максимальних контактних тисків $p(\alpha, \delta)$ від кута α_2 повороту вала, а також їх величини $p(\lambda, \delta, h)$ у результаті зношування. Також тут показано схеми контакту вала і втулки в окремих фазах.

Аналіз отриманих результатів показує, що рівень найбільших тисків в фазі однообластєвого контакту є нижчим, ніж двообластєвого. В процесі зношування відбувається зниження їх величини. Має місце деяка асиметрія розподілу тисків у двообластєвому контакті для т. P_1 (спадаюча крива) та т. P_2 (зростаюча крива).

На рис. 3 подано залежності для випадку $\delta_2 = 0,3$ мм, $\delta_2 = 0,25$ мм.

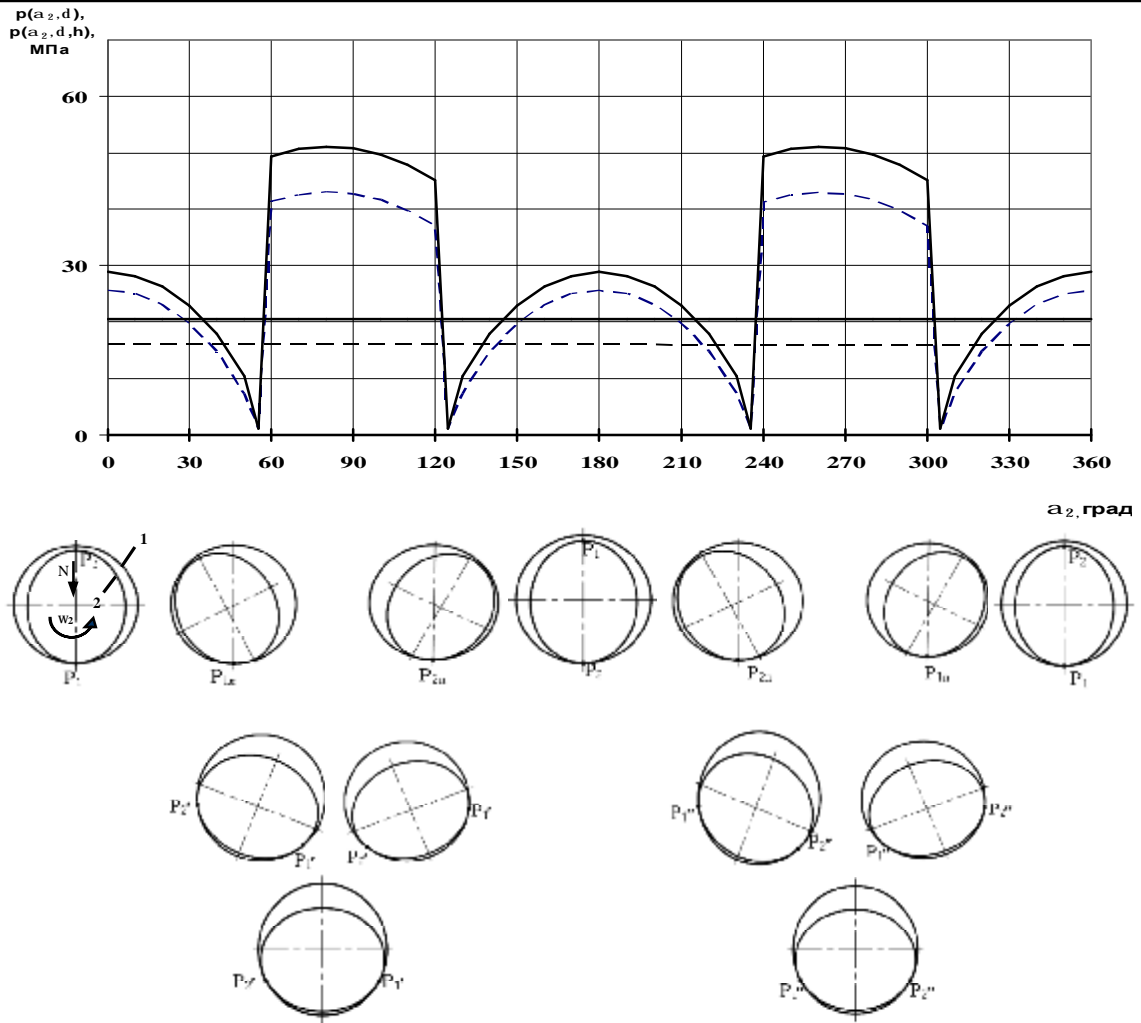


Рис. 2 – Залежність максимальних контактних тисків від положення вала: суцільні лінії – початкові тиски, штрихові – при – вибраному допустимому зношуванні $h_{1*} = 0,3$ мм втулки

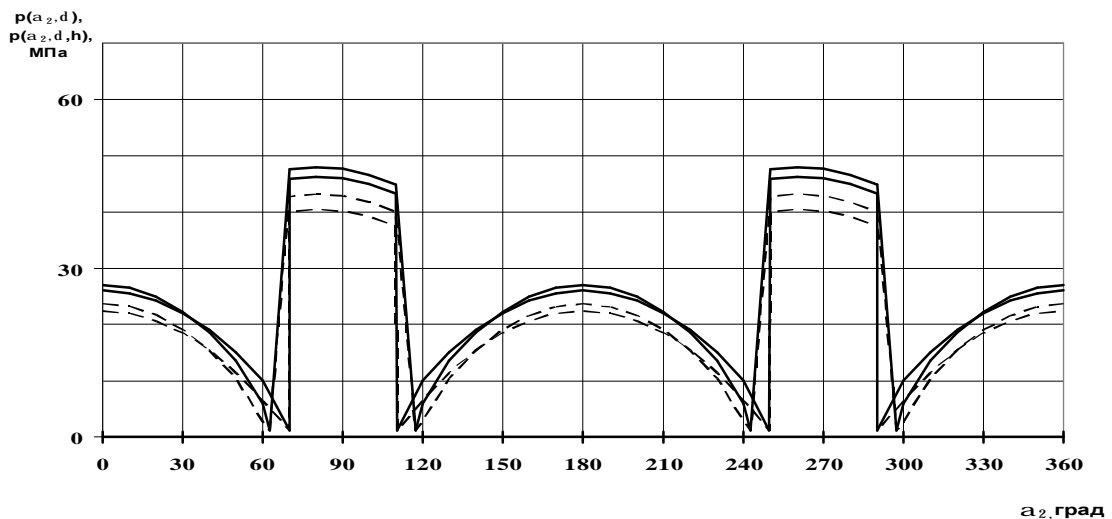


Рис. 3 – Залежність максимальних контактних тисків від положення вала

Аналіз рисунка показує, що спостерігаються такі ж закономірності зміни $p(0, \delta)$ і $p(\lambda, \delta)$ як в попередньому випадку. Лише їх рівень є нижчим, особливо в фазі двообластевого контакту.

На рис. 4 зображено також графіки зміни тисків при обертанні вала при однообластевому контакті (криві 1, 1', 2, 2') та ідеалізованих (колових) контурів (лінії 0, 0').

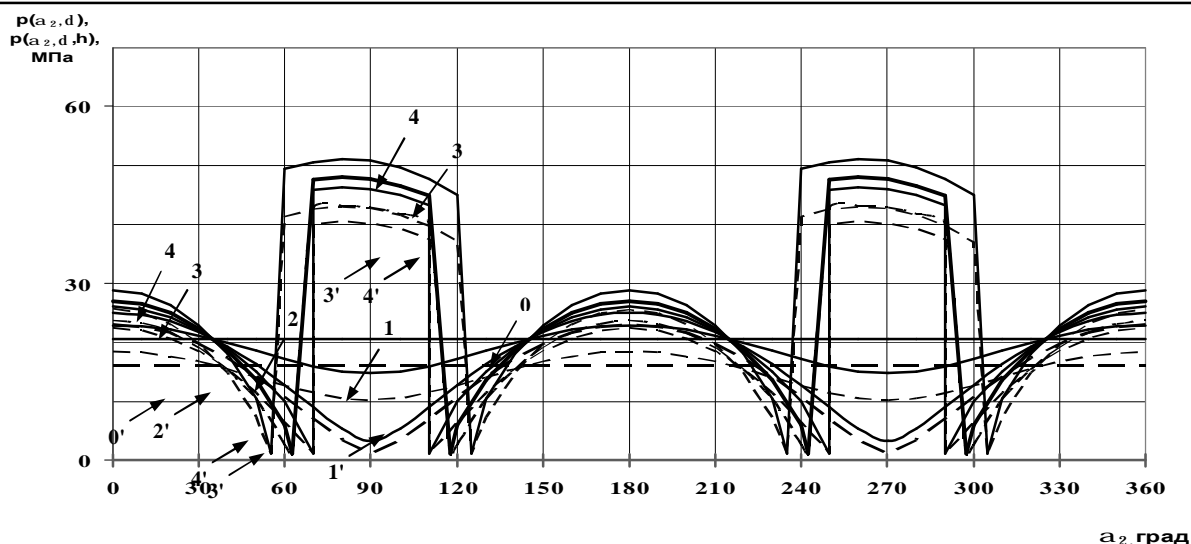


Рис. 4 – Залежність максимальних контактних тисків від положення вала для однообластєвого та змішаного контакту:
 0, 0' - $\delta_1 = \delta_2 = 0$; 1, 1' - $\delta_2 = 0,1$ мм; 2, 2' - $\delta_2 = 0,2$ мм;
 3, 3' - $\delta_2 = 0,3$ мм; 4, 4' - $\delta_2 = 0,4$ мм

У фазах однообластєвого контакту ($\delta_2 = 0; 0,1; 0,2$ мм) при збільшенні овальності δ_2 вала найбільші тиски p_{\max} будуть дещо зростати, однак вони є меншими, ніж у фазах змішаного контакту. Відбувається циклічна зміна тисків від max до min зі зміною кута повороту вала.

Аналіз закономірностей зміни максимальних контактних тисків внаслідок зношування (рис. 2 - 4) показує, що у випадку максимальної овальності вала $\delta_2 = 0,4$ мм спостерігається найбільше зниження початкового тиску $p(\alpha_2, \delta)$. Для овальності $\alpha_2 = 0,3$ мм це зниження тиску є меншим, а при $\delta_2 = 0,25$ мм найменшим (змішаний контакт). Подальше зменшення овальності, коли реалізується однообластєвий контакт, призводить до парадоксального, на перший погляд, результату. При $\delta_2 = 0,2$ мм різниця тисків $p(\alpha_2, \delta)$ та $p(\alpha_2, \delta, h)$ є найменшою, а далі вона зростає, досягаючи максимального значення при $\delta_2 = 0$. Цей факт можна пояснити тим, що при $\delta_2 = 0,2$ мм, яке є близьким до граничного значення $\delta_2 = 0,205$ мм переходу однообластєвого контакту у двообластєвий, спостерігається різке зменшення тиску в діапазоні $45^\circ \leq \alpha_2 \leq 135^\circ$.

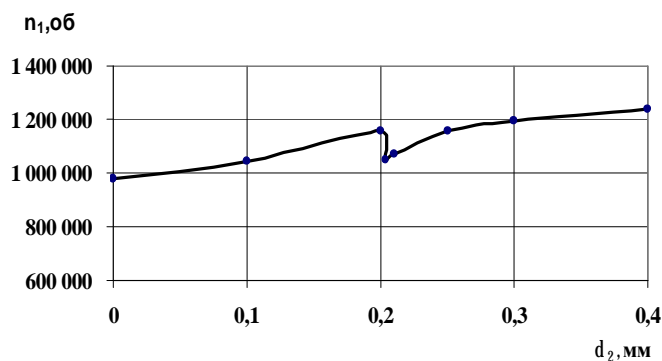


Рис. 5 – Довговічність підшипника

Тобто технологічна овальність валу має оптимальне значення, при якому довговічність підшипника буде найвищою як в області однообластєвого, так і двообластєвого контакту (рис. 5).

Аналіз результатів свідчить, що зростання величини овальності вала призводить до суттєвого зростання довговічності підшипника. При чому найвищою вона є при реалізації змішаного контакту ($\delta_2 = 0,3; 0,4$ мм).

Рис. 6, 7 вказують характер зношування вала і втулки при однообластевому і змішаному контакті для випадку, коли $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ мм. Зокрема на рис. 7 наведено зміну максимального зношування h_1 втулки підшипника за однакової кількості обертів вала ($n_2 = 972000$ об) з овальністю контуру, за яких при $\delta_1 = \delta_2 = 0$ досягається допустиме зношування втулки 0,3 мм.

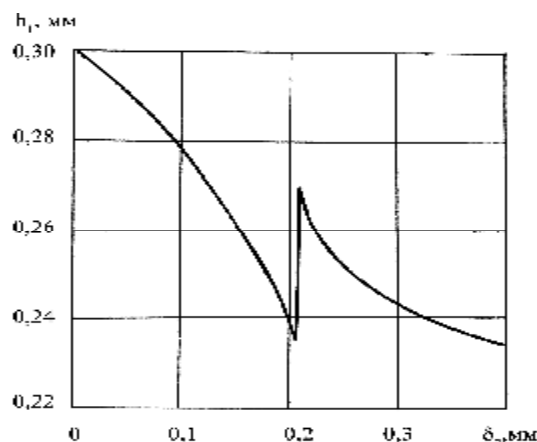


Рис. 6 – Лінійне зношування втулки підшипника у однообластевому та двообластевому $\delta_2 > 0,205$ мм контакті

При однообластевому контакті (рис. 2 - 4) із зростанням овальності вала спостерігається зменшення зношування h_1 втулки і, відповідно, зростання довговічності n_2 підшипника (рис. 5) до досягнення допустимого зношування $h_{1*} = 0,3$ мм втулки.

Таблиця 1

δ_2 , мм	α_2 , град	$p(\alpha_2, \delta)$, МПа	$p(\alpha_2, \delta, h)$, МПа	h_1 , мм	h_2 , мм
0	0	20,545	16,025	0,297	$5,62 \cdot 10^{-3}$
	90°	20,545	16,015	0,297	$5,62 \cdot 10^{-3}$
0,1	0	22,913	18,469	0,278	$6,095 \cdot 10^{-3}$
	90°	14,707	10,255	0,279	$4,36 \cdot 10^{-3}$
0,2	0	25,058	23,009	0,238	$6,504 \cdot 10^{-3}$
	90°	3,24	1,2	0,238	$0,706 \cdot 10^{-3}$
0,21	0	25,265	23,377	0,271	$7,86 \cdot 10^{-3}$
	90°	44,68	42,8	0,02	0,0117
0,25	0	26,06	22,43	0,251	$8,039 \cdot 10^{-3}$
	90°	46,028	40,21	0,02	0,059
0,3	0	27,03	23,75	0,244	$8,25 \cdot 10^{-3}$
	90°	47,66	42,83	0,021	0,061
0,4	0	28,874	25,63	0,235	$8,65 \cdot 10^{-3}$
	90°	50,77	42,75	0,022	0,087

Поворот вала з овальністю $\delta_2 > 0$ спричиняє зниження $p(\alpha_2, \delta)$, інтенсивність якого суттєво залежить від величини δ_2 (рис. 5, табл. 1). Власне тиски $p(\alpha_2, \delta)$ для вала з овальністю ($\delta_2 > 0$) в різній степені перевищують тиски $p(0,0)$ (вал колового перерізу) лише на 39,2 % оберту, а на 60,8 % оберту вони є нижчими (рис. 4). Це і зумовлює зниження зношування втулки при зростанні δ_2 .

Зношування вала по контуру є майже на два порядки меншим, ніж втулки (рис. 7, графік 3; табл. 1).

У змішаному (одно-дво-однообластевому) контакті взаємодія вала із втулкою є значно складнішою (рис. 3). Аналіз результатів обчислень, поданих графічно (рис. 2 - 4), свідчить, що у зоні однообластєвого контакту зростання овальності вала призводить до зростання тисків $p(0, \delta)$ які, однак, при його обертанні спадають до $p_{\min} = 0,6N/R_2$ значно швидше, ніж у вищерозглянутому випадку, а потім стрімко зростають у зоні двообластєвого контакту (рис. 2 - 4).

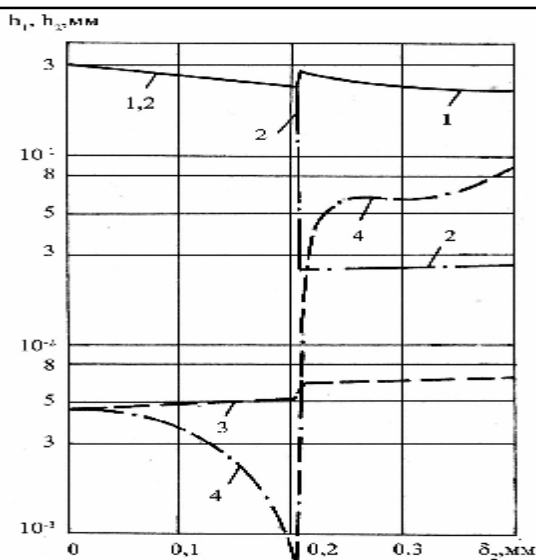


Рис. 7 – Зношування втулки і вала підшипника у однобластевому та двобластевому контакті за кутів повороту вала $\alpha_2 = 0^\circ$; $\alpha_2 = 90^\circ$:
 1 – h_1 ($\alpha_2 = 0^\circ$); 2 – h_1 ($\alpha_2 = 90^\circ$);
 3 – h_2 ($\alpha_2 = 0^\circ$); 4 – h_2 ($\alpha_2 = 90^\circ$)

При куті повороту вала $\alpha_2 = 90^\circ$ в зоні однобластєвого контакту зношування втулки буде таким же як і при $\alpha_2 = 0$ (рис. 7, графік 2 – ліва вітка), а зношування вала ще значно зменшується (рис. 7, графік 4 – ліва вітка). У зоні двобластєвого контакту втулка зношуватиметься по контуру на певному його діапазоні, що призводить до зниження її зношування на порядок (рис. 7, графік 2 – права вітка), а вал – у двох симетричних точках співдотику (схема на рис. 3), що спричиняє зростання зношування на два порядки (рис. 7, графік 4 – права вітка; табл. 1).

Зношування втулки при $\alpha_2 = 0^\circ$ у зоні двобластєвого контакту при змішаному співдотику спочатку стрибкоподібно зростає при $\delta_2 \approx 0,205$ мм (рис. 6, 7), а потім із зростанням δ_2 знову знижується, що пов'язано із розширенням діапазону двобластєвого контакту і, відповідно, зменшенням діапазону однобластєвого контакту (рис. 3, 4). Зношування втулки при $\alpha_2 = 90^\circ$ в цьому випадку різко зменшується на порядок (рис. 7, графік 2 – права вітка), в подальшому мало змінюючись, що зумовлено розподілом зношування по її контуру на певному діапазоні кутів повороту вала.

Встановлено, що овальність вала виявляє корисний вплив як на зростання довговічності підшипника (рис. 5), так і на зниження зношування втулки (рис. 6). Без огляду на вид контакту (однобластєвий чи змішаний) довговічність підшипника визначається довговічністю втулки у зоні однобластєвого контакту при кутах повороту вала $\alpha_2 = 0, 180^\circ, 360^\circ$.

Література

1. Андрейків А.Е., Чернец М.В. Оценка контактного взаимодействия трущихся деталей машин. – К.: Наукова думка, 1991. – 160 с.
2. Чернец М.В., Лебедева Н.М. Оцінка кінетики зношування трибосистем ковзання при наявності овальності контурів їх елементів за кумуляційною моделлю // Проблеми трибології. – 2005. – №4. – С. 114-120.
3. Чернец М., Андрейків О., Лебедева Н. Дослідження впливу складного огранення деталей підшипника ковзання на параметри контактної та трибоконтатної взаємодії // Проблеми трибології. – 2007. – №4. – С. 50-54.
4. Чернец М.В., Андрейків О.Є., Лебедева Н.М., Жидик В.Б. Модель оцінки зношування і довговічності підшипника ковзання за малої некруглості // ФХММ. – 2009. – №2. – С. 121-129.

Поступила в редакцію 04.01.2013

Chernets M.V., Zhydyk V.B. **Generalized cumulation model of kinetics of wear a sliding bearing. P.2. Generalized cumulative model.**

The generalized cumulation model of kinetics of wear the sliding bearing elements in case of single-double-single-area contacts realization, which comes forward in different phases of shaft rotation with small ovality of contour in a bush with circle contour, are presented. In the result of the task's numerical solution the regularities of the change of an initial maximum contact pressure when shaft rotation and its change due to wear, durability of the bearing and linear wear of bush and shaft depending on the size of ovality are established in the work. Contact pressures are substantially greater in the zones of double-area contact, than in the zones of single-area. The shaft ovality increases the bearing longevity and reduces the hob wear. The results are presented graphically.

References

1. Andrejkiv A.E., Chernets M.V. Ocenka kontaktneho vzaimodejstvija trushchihsja detalej mashyn. Naukova dumka, 1991., 160 p.
2. Chernets M.V., Ljebjedjeva N.M. Ocinka kinetyky znoshuvannja trybosystem kovzannja pry najavnosti ovalnosti konturiv jih elementiv za kumulacijnoju modellju. Problemy trybologi, 2005, No 4, pp. 114-120.
3. Chernets M., Andrejkiv O., Ljebjedjeva N. Doslidzhennja vplyvu skladnoho ohranennja detalej pidshypnyka kovzannja na parametry kontaktnoji ta trybokontaktnoji vzajemodiji. Problemy trybologii, 2007. No 4, pp. 50-54.
4. Chernets M.V., Andrejkiv O.Je., Ljebjedjeva N.M., Zhydyk V.B. Model ocinky znoshuvannja i dohovichnosti pidshypnyka kovzannja za maloji nekruhlosti. FHMM. 2009. No 2, pp. 121-129.