



УДК 629.114

І.І.Заліско, аспірант КНУБА

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КІЛЕЦЬ ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО КРУГА АВТОМОБІЛЬНОГО КРАНУ

Актуальність проблеми. Відомо, що дефекти поверхонь бігових доріжок опорно-поворотного круга (ОПК) при подальшому використанні крану призводять до підклинювання чи повного заклинювання ОПК, до трудомістких процесів або до відсутності можливості їх розбирання, порушенню цілісності різьбових з'єднань, зростання динамічних навантажень на всі металоконструкції й в кінцевому випадку можуть призвести до зниження загальної стійкості автокрану з наступним його перекиданням.

Відомий спосіб [1] ремонту кілець ОПК автокранів за допомогою направлення, проте він застосовний до ОПК малих типорозмірів, котрі не перевищують одного метра у діаметрі. Якщо вказаний вище спосіб застосовувати до ОПК більших типорозмірів ($d=2,0$ і більше), то виникають незворотні локальні та загальні дефекти, які виключають можливість їхнього використання за прямим призначенням.

Таким чином, висока складність технології ремонту і неможливість її окремих операцій до конструкцій кілець ОПК автокранів, високі вимоги до геометричних параметрів й низькі значення допусків, не дозволяють здійснювати якісний ремонт кілець ОПК автокранів методом направлення поверхні бігової доріжки, а передумовою до пошуку інших "альтернативних" шляхів вирішення цієї проблеми.

Постановка задач досліджень. Одним із можливих напрямів підвищення надійності та ресурсу ОПК автокранів є заміна та елементів кочення, а також вдосконалення технологічної обробки їх, а також самих доріжок кочення кілець ОПК.

Для реалізації запропонованих підходів та методів необхідно:

- встановити якісні та кількісні характеристики напружено-деформованого стану (НДС) як кілець ОПК автокранів, так і самих тіл кочення у залежності від стану поверхонь кочення. Останнє вимагає, у свою чергу, розв'язання контактної задачі та встановлення всіх основних характеристик контакту.
- визначити критичний рівень напружень у перерізах самого кільця та тіл кочення.

У свою чергу, аналіз НДС кілець ОПК автомобільного крану та тіл кочення вимагає наступного:

- розробки математичної моделі перерозподілу навантажень на тіла кочення при зношуванні бігових доріжок ОПК;
- розробки математичної моделі, яка б адекватно описувала й досить точно визначала коефіцієнт опору обертання ОПК за різних значень діаметрів кругового ОПК;
- встановити й кількісно оцінити вплив параметрів (геометричних, фізико-механічних) контактної плями тіл кочення на загальний напружений стан кілець ОПК автокранів;
- запропонувати розрахункову схему, яка б дозволяла визначати навантаження на тіла кочення по довжині кілець ОПК.

Математична модель перерозподілу навантажень на тіла кочення при зношуванні бігових доріжок ОПК автокранів.

Розглянемо вертикальний переріз ОПК автокранів кулькового типу (рис.1), передбачаючи, що окремі кулі вже зношені й мають менший діаметр у порівнянні з незношеними або зношеними у меншій мірі.

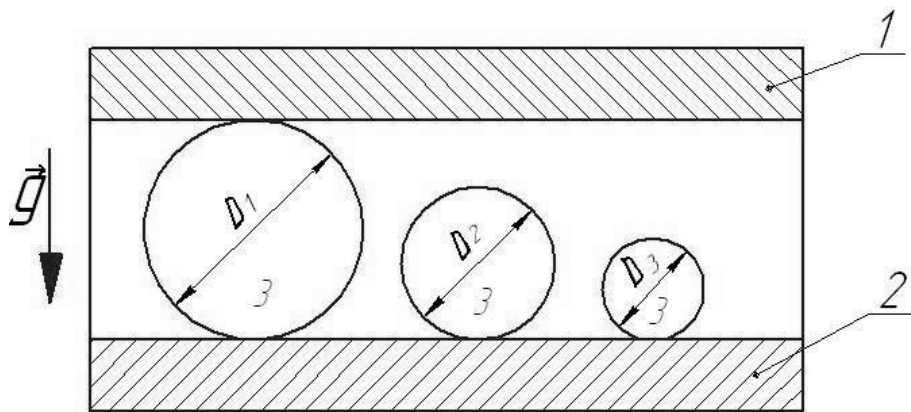


Рис.1. Вертикальний переріз ОПК автокранів з урахуванням зношування тіл кочення.

- 1 - верхня бігова доріжка
- 2 - нижня бігова доріжка
- 3 - кулі різних діаметрів ($D_1 > D_2 > D_3$)
-
- g - вектор прискорення земного тяжіння.

Використовуючи підходи, що приведені в роботах [1,2], можна встановити основні характеристики параметрів контакту тіл у ОПК автокранів для оптимізації тіл кочення - роботи [3].

А. Розглянемо спочатку випадок, коли матеріал кілець та куль однаковий. Припустимо навантаження на кулю діаметру D_1 [2]:

$$[F_1] = \frac{[v_{\max}]^3 \cdot R_1^2}{(0,388)^3 \cdot E^2}, \quad (1)$$

де $R_1 = \frac{D_1}{2}$, v_{\max} - максимальне контактне напруження, E - модуль пружності матеріалу кілець ОПК та куль.

Зближення кілець при дії на кулю діаметру D_1 сили F_1 визначається за формулою:

$$\Delta_1 = 2 \cdot 1,231 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{[F_1]^2}{E^2}\right) \cdot \frac{1}{R_1}}, \quad (2)$$

де, як і у (1) прийнято, що коефіцієнт Пуассона матеріалу кулі й бігових доріжок $\mu = 0,3$ [2].

Б. Матеріали кілець ОПК та куль різні.

Позначимо у подальшому індекси “ σ_o ” фізико-механічні характеристики бігових доріжок ОПК (верхньої та нижньої), а індексом “ κ ” такі ж характеристики тіл кочення ОПК автомобільного крану.

Тоді $E_{\sigma_o} \neq E_{\kappa}$, $\mu_{\sigma_o} \neq \mu_{\kappa}$.

У такому випадку припустимо навантаження на кулю діаметром D_1 має вигляд:

$$[F_1] = \frac{[v_{\max}]^3 \cdot R_1^2 \cdot \left(\frac{1 - \mu_{\sigma_o}^2}{E_{\sigma_o}} + \frac{1 - \mu_{\kappa}^2}{E_{\kappa}}\right)^2}{(0,5784)^2} \quad (3)$$



Зближення кілець ОПК при дії сили $[F_1]$ (3) на кулю діаметру D_1 можна визначити наступним чином:

$$\Delta_1 = 2 \cdot 0,8255 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{[F_1]^2}{R_1}\right) \cdot \left(\frac{1 - \mu_{\sigma_0}^2}{E_{\sigma_0}} + \frac{1 - \mu_{\kappa}^2}{E_{\kappa}}\right)^2} \quad (4)$$

Слід зазначити, що у формулі (1) під \mathbf{v}_{\max} розуміють:

$$\mathbf{v}_{\max} = 0,388 \cdot \sqrt[3]{F_1 \cdot E^2 \cdot \frac{1}{R_1^2}} \quad (5)$$

а у формулі (3) параметр \mathbf{v}_{\max} слід визначати так:

$$\mathbf{v}_{\max} = 0,5784 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_1}{R_1^2 \cdot \left(\frac{1 - \mu_{\sigma_0}^2}{E_{\sigma_0}} + \frac{1 - \mu_{\kappa}^2}{E_{\kappa}}\right)^2}} \quad (6)$$

Знайдемо тепер зближення кілець ОПК й величини навантажень на кулі D_2 і D_3 - діаметрів (для випадків А та Б).

Якщо матеріали куль та бігових доріжок ОПК автокрану однакові, можна Δ_1 та Δ_2 визначити наступним чином:

$$\Delta_2 = \Delta_1 - (D_1 - D_2); \quad \Delta_3 = \Delta_1 - (D_1 - D_2). \quad (7)$$

Слід зазначити, що формули (7) справедливі як для випадку А, так і для випадку Б.

(Допустиме навантаження на кулі D_2 та D_3 - діаметрів для випадку А має вигляд:

$$\begin{cases} F_2 = \frac{\Delta_2 \cdot E}{2 \cdot 1,231} \cdot \sqrt{\frac{\Delta_2 \cdot R_2}{2 \cdot 1,231}} & , R_2 = \frac{D_2}{2}, \\ F_3 = \frac{\Delta_3 \cdot E}{2 \cdot 1,231} \cdot \sqrt{\frac{\Delta_3 \cdot R_3}{2 \cdot 1,231}} & , R_3 = \frac{D_3}{2}. \end{cases} \quad (8)$$

Допустиме навантаження на кулі D_2 і D_3 діаметрів для випадку Б має вигляд:

$$\begin{cases} P_2 = \frac{\Delta_2 \cdot \left(\frac{1 - \mu_{\sigma_2}^2}{E_{\sigma_2}} + \frac{1 - \mu_{\kappa}^2}{E_{\kappa}}\right)^{-1}}{2 \cdot 0,825} \cdot \sqrt{\frac{\Delta_2 \cdot R_2}{2 \cdot 0,8255}} \\ P_3 = \frac{\Delta_3 \cdot \left(\frac{1 - \mu_{\sigma_2}^2}{E_{\sigma_2}} + \frac{1 - \mu_{\kappa}^2}{E_{\kappa}}\right)^{-1}}{2 \cdot 0,825} \cdot \sqrt{\frac{\Delta_3 \cdot R_3}{2 \cdot 0,8255}} \end{cases}, \quad (9)$$

Величини Δ_2 та Δ_3 зручно подати у такому виді:

$$\Delta_2 = \Delta_1 \cdot \left\{1 - \frac{(D_1 - D_2)}{\Delta_1}\right\}; \quad \Delta_3 = \Delta_1 \cdot \left\{1 - \frac{(D_1 - D_3)}{\Delta_1}\right\}. \quad (10)$$

Виходячи з формул (8), (10) видно, що у випадку А куля діаметру D_2 недовантажена на величину ${}_{\Delta}F_2$ (у порівнянні з кулею діаметру D_1):

$${}_{\Delta}F_2 = \frac{E \cdot R_1^{1/2} \cdot \Delta_1^{3/2}}{(2 \cdot 1,231)^{3/2}} \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \frac{(D_1 - D_2)}{\Delta_1} \right]^{3/2} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{1/2} \right\}. \quad (11)$$

Аналогічно, куля D_3 – діаметру недовантажена на величину ${}_{\Delta}P_3$ (у порівнянні з кулею діаметру D_1): для випадку А:

$${}_{\Delta}F_3 = \frac{E \cdot R_1^{1/2} \cdot \Delta_1^{3/2}}{(2 \cdot 1,231)^{3/2}} \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \frac{(D_1 - D_3)}{\Delta_1} \right]^{3/2} \cdot \left(\frac{R_3}{R_1} \right)^{1/2} \right\}. \quad (12)$$

Отже, у випадку А, куля діаметру D_1 у порівнянні з кулею діаметру D_2 перевантажена у:

$$n_{12} = \frac{F_1}{F_2} = \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_2} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{1/2} \text{ разів, а у порівнянні з кулею діаметром } D_3 \text{ перша куля (} D_1 \text{)}$$

перевантажена у:

$$n_{13} = \frac{F_1}{F_3} = \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_3} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{R_1}{R_3} \right)^{1/2} \text{ разів.}$$

Інакше величини n_{12} й n_{13} можна подати наступним чином (для випадку А):

$$\begin{cases} n_{12} = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{1/2} \cdot \left[1 - \frac{(D_1 - D_2)}{\Delta_1} \right]^{-3/2}; \\ n_{13} = \left(\frac{R_1}{R_3} \right)^{1/2} \cdot \left[1 - \frac{(D_1 - D_3)}{\Delta_1} \right]^{-3/2}. \end{cases} \quad (13)$$

Вважаючи, що $\frac{\Delta_1}{R_1} \ll 1$ можна отримати з (13) наближені формули:

$$n_{12} \approx \left[1 - \frac{(D_1 - D_2)}{\Delta_1} \right]^{-3/2}; \quad n_{13} \approx \left[1 - \frac{(D_1 - D_3)}{\Delta_1} \right]^{-3/2}. \quad (14)$$

Нижче, у таблиці 1 надані результати розрахунку n_{12} для різних значень $\frac{(D_1 - D_2)}{\Delta_1}$.

Таблиця 1. Значення n_{12} для різних $\frac{(D_1 - D_2)}{\Delta_1}$ за (14)

$\frac{(D_1 - D_2)}{\Delta_1}$	n_{12}	$\frac{(D_1 - D_2)}{\Delta_1}$	n_{12}	$\frac{(D_1 - D_2)}{\Delta_1}$	n_{12}
0,01	1,015	0,25	1,540	0,50	2,828
0,05	1,080	0,30	1,707	0,55	3,313
0,10	1,171	0,35	1,908	0,60	3,953
0,15	1,276	0,40	2,152	0,65	4,829
0,20	1,398	0,45	2,452	0,70	6,086



Отже, як випливає з результатів розрахунків, поданих у табл. 1 для випадку А зміна показника $\frac{(D_1 - D_2)}{\Delta_1}$ у діапазоні (0,01...0,70) призводить до перевантаження на кулі діаметром D_1 у (1,015...6,086) разів.

Слід зазначити, що максимальні значення дотичного (τ_{msx}) та нормального (ν_{1max}) напружень визначається з наступних виразів:

а) випадок А –

$$\tau_{msx} = \frac{1}{3} \nu_{max} ; \quad \nu_{1max} = 0,133 \nu_{max} ,$$

$$\text{де } \nu_{max} = 0,388 \cdot \sqrt[3]{F_1 \cdot E^2 \cdot \frac{1}{R_1^2}} ;$$

(15)

б) Випадок Б –

$$\tau_{msx} = \frac{1}{3} \nu_{max} ; \quad \nu_{1max} = 0,133 \nu_{max} , \quad (16)$$

$$\text{де } \nu_{max} = 0,5784 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_1}{R^2} \cdot \left(\frac{1 - \mu_{\delta_2}^2}{E_{\delta_2}} + \frac{1 - \mu_k^2}{E_k} \right)^{-2}}$$

Математична модель для визначення коефіцієнту опору обертанню ОПК та самих куль (тіл кочення).

Розріз однорідного опорно-поворотного кульового круга (рис.2,а) та його розрахункова схема (рис.2,б) подані на рис.2.

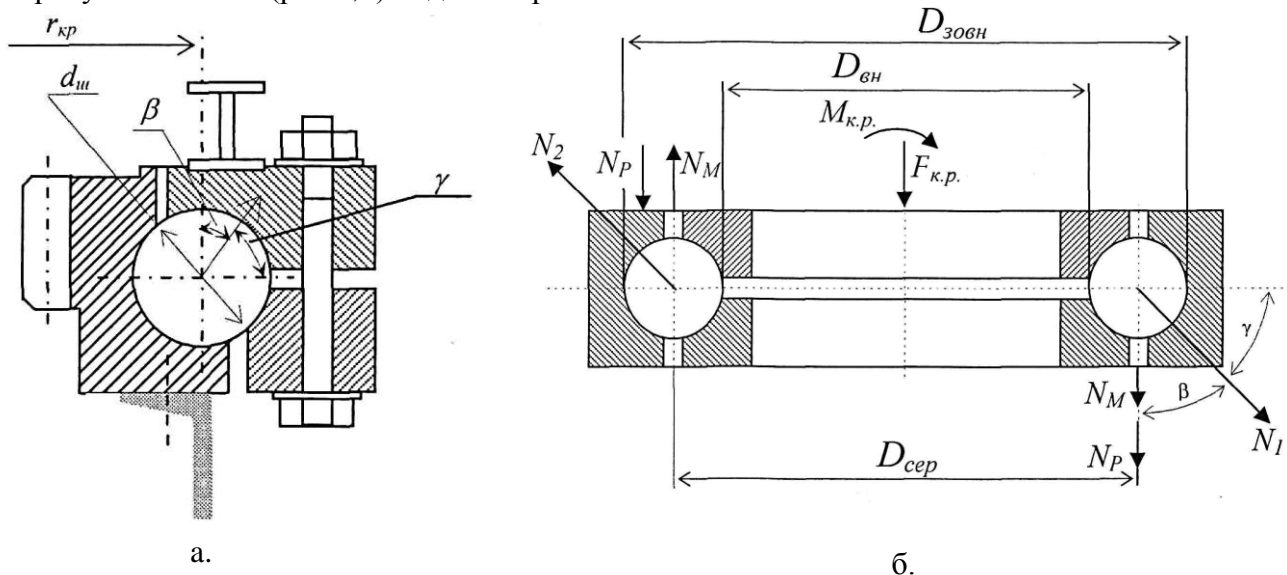


Рис.2. Опорно-поворотний круг:
а – переріз; б-розрахункова схема.

Умовний тиск і навантаження на бігову доріжку від сили (F) й моменту (M) можна подати наступними співвідношеннями:

$$\sigma_p = \frac{F_{к.р.}}{\frac{\pi}{4} \cdot (D_{зовн.}^2 - D_{вн.}^2) \cdot \cos \beta}, \quad (17)$$

$$\sigma_M = \frac{M_{к.р.}}{\frac{\pi}{32} \cdot \left\{ \frac{D_{зовн.}^2 - D_{вн.}^2}{D_{зовн.}} \right\} \cdot \cos \beta}, \quad (18)$$

$$\text{де } D_{сер} = \frac{D_{зовн.} - D_{вн.}}{2}.$$

При цьому максимальне значення напруження складає:

$$\sigma_{\max} = 0,245 \cdot n_p \cdot \sqrt[3]{N \cdot E^2 \cdot \left(\frac{2r_g - r_k}{r_g \cdot r_k} \right)} \leq [\sigma], \quad (19)$$

де r_g - радіус бігової доріжки, r_k - радіус кульки, N - сумарне значення напружень для матеріалу ОПК, n_p - коефіцієнт запасу міцності матеріалу ОПК при стискуванні-розтягу.

Визначимо далі вплив на коефіцієнт опору обертанню ОПК різних механічних, фізичних та геометричних факторів.

Складові силових навантажень (див. рис.2,б) визначаються наступним чином:

$$N_p = \frac{1}{2} \cdot F_{к.р.}; N_M = \frac{M_{к.р.}}{D_{сер}}; N_{np} = \frac{N_p + N_M}{\cos \beta}; N_l = \frac{N_p - N_M}{\cos \beta}; \quad (20)$$

$$F_{np} = \frac{2N_{np} \cdot k_{np}}{r_k}; F_l = \frac{2N_l \cdot k_l}{r_k}; \quad (21)$$

Моменти розраховуються так:

$$M_{np} = F_{np} \cdot \frac{D_{сер}}{2}; M_l = F_l \cdot \frac{D_{сер}}{2}; M_{\Sigma} = M_{np} + M_l. \quad (22)$$

Коефіцієнт тертя можна визначити за формулою:

$$f = \frac{M_{\Sigma} \cdot \cos \beta}{(N_{np} + N_l) \cdot D_{сер}}. \quad (23)$$

Використовуючи (21), (22) вираз (23) можна подати так:

$$f = \frac{M_{\Sigma} \cdot \cos \beta}{N_p \cdot D_{сер}}, \quad (24)$$

$$\text{тоді: } M_{\Sigma} = (2N_{np} \cdot D_{сер} \cdot f) / \cos \beta. \quad (25)$$

Отже, з (25) випливає, що $M_{\Sigma} \propto D_{сер}^1$.

Зі співвідношень (21)-(24) можна отримати:

$$f = \frac{\left(1 + \frac{N_M}{N_p} \right) \cdot k_{np} + \left(1 - \frac{N_M}{N_p} \right) \cdot k_l}{2r_k}. \quad (26)$$

У (21) та (26) k_{np} і k_l - коефіцієнти тертя кочення правої та лівої куль (рис.2,б) ОПК. З (26) для r_k маємо:



$$r_k = \frac{(k_{np} + k_l) + \frac{2 \cdot M_{к.р.}}{F_{к.р.} \cdot D_{сер}} \cdot (k_{np} - k_l)}{2f}. \quad (27)$$

Міняючи у (27) r_k та f місцями отримаємо $f \propto D_{сер}^{-1}$.

Тоді як для діаметру кульки з (27) матимемо:

$$d_k = \frac{(k_{np} + k_l) + \frac{2 \cdot M_{к.р.}}{F_{к.р.} \cdot D_{сер}} \cdot (k_{np} - k_l)}{f}. \quad (28)$$

Таким чином, $d_k \propto D_{сер}^{-1}$. При зростанні $d_k \propto D_{сер}$, то d_k спадає, і навпаки.

$$\lim_{D_{сер} \rightarrow \infty} (d_k) = \frac{(k_{np} + k_l)}{f}. \quad (29)$$

$$D_{сер} \rightarrow \infty$$

Чисельний розрахунок за формулою (28) показує, що при зміні d_k на +15% (з $d_k = 60 \cdot 10^{-3}$ м до $d_k = 70 \cdot 10^{-3}$ м) для типових ОПК автокранів, коефіцієнт f (26) зменшується на ту ж величину -15% ($f_{поч.} = 0,016$; $f_{кін.} = 0,0135$).

Висновки:

1. Збільшення діаметрів куль ОПК автокранів на +15% у порівнянні з їх нормативними значеннями ($d_k = 60 \cdot 10^{-3}$ м) призводить до зменшення приведенного коефіцієнту опору обертанню ОПК f до -15%.
2. Встановлено, що при зміні відношення $\frac{N_M}{N_p} \propto D_{сер}^{-1}$ коефіцієнт f теж змінюється, а саме: зростання $D_{сер}$ зменшує f_0 .
3. Збільшуючи d_k (r_k) й зменшуючи $D_{сер}$, можна отримати менші значення f й опору обертання $\propto M_\Sigma$, що дає можливість підвищити експлуатаційний ресурс ОПК автокранів.

Література

1. Казанский А.М. Современные конструкции и расчет опорно-поворотных кругов. – М.: ЦНШТЭстроймаш. 1980.-55с.
2. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1988.-736с.
3. Орлова А.В. Оптимизация рабочих поверхностей опор качения. – М.: Наука, 1973.-83с.