

УДК 621.825.5

DOI: 10.15276/pidtt.1.69.2025.08

Малащенко В. О., Сороківський О. І.

Національний університет «Львівська політехніка»

НАВАНТАЖЕННЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КУЛЬКОВИХ МУФТ ВІЛЬНОГО ХОДУ

Анотація. В статті розглянуто особливості конструкції кулькової муфти вільного ходу та принципу її роботи. Запропоновано методiku розрахунку поперечних зусиль, згинальних моментів та осьових деформацій основних елементів кулькової муфти вільного ходу. Наведені матеріали дозволяють проектувальникам раціонально підібрати матеріали для виготовлення та основні геометричні параметри наведеної кулькової муфти вільного ходу.

Ключові слова: муфта, муфта вільного ходу, напруження, півмуфта, з'єднання півмуфт.

Вступ

Муфти є відповідальними частинами машин і механізмів, які суттєво впливають на рівень і характер навантаження кінематичних ланцюгів механічного привода. Також вони часто виконують функції захисних пристроїв відповідальних механічних приводів від перевантажень, а також функції регуляторів швидкості руху та напряду передавання енергії.

Найчастіше використовуються муфти для з'єднання валів, що мають загальну геометричну вісь обертання або їхні геометричні осі можна легко відцентрувати. Поряд з тим, муфти застосовують і для з'єднання не співвісних валів, геометричні осі яких мають радіальне, осьове та кутове зміщення, наприклад у поїздах метро.

Аналіз останніх досягнень та публікацій

Для автоматичного регулювання технологічними процесами широко застосовуються муфти вільного ходу, що дозволяють автоматично з'єднувати і роз'єднувати вали без зупинки двигуна, а також передавати обертальний момент тільки в одному напрямку.

Основні відомі дослідження муфт вільного ходу стосуються роликівих та храпових механізмів, які описано в роботах: Полякова В.С., Іванова М.М., Нагорняка С.Г., Раховського О.А. [8]. В Національному університеті «Львівська політехніка» було розроблено ряд конструкцій кулькових муфт вільного ходу, які захищено патентами на винаходи та корисні моделі. Дані конструкції досліджено в роботах

Малащенко В.В., Кравця І.Є.. Малащенко В.В., Сороківського О.І., Бориса А.О. та інших [1-5, 9-11].

Мета дослідження

Розробка методики розрахунку на міцність нових кулькових муфт вільного ходу дозволить раціонально вибрати основні геометричні параметри півмуфт під час їх проектування.

Виклад основного матеріалу. Основні деталі конструкції кулькової муфти вільного ходу зображено на рис. 1. Муфта складається з ведучої півмуфти 1, на торці якої виконано пази 4 зі зміщенням від геометричної осі муфти до периферії, та веденої півмуфти 2. На торці веденої півмуфти виконано кільцевий паз 5 і дотичні пази 6, що тангенціально відходять від кільцевого паза. В пазах ведучої півмуфти розміщено кульки 3. Кількість пазів відповідає кількості кульок та залежить від геометричних параметрів муфти та її навантажувальної здатності. Глибина пазів півмуфт також погоджується з діаметром кульки.

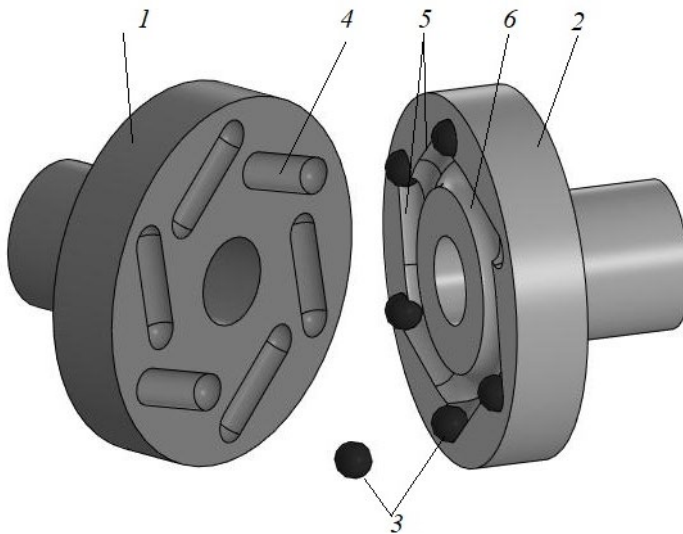


Рисунок 1 – Елементи будови кулькової муфти вільного ходу

Принцип роботи кулькової муфти вільного ходу є наступним. Під час обертання ведучої півмуфти 1 за годинниковою стрілкою (рис. 1) кульки 3 під дією відцентрової сили, що виникає під час обертання, виштовхуються у найближчий дотичний паз 5 веденої півмуфти 2. Далі, під дією тиску бокових поверхонь даних пазів півмуфт 1 і 2, кульки 3 досягають їх периферійних кінців і передають навантаження на ведену півмуфту 2, яка починає обертатись. Механізм буде працювати в робочому режимі і передавати обертовий момент від двигуна до робочого органу машини.

Під час обертання ведучої півмуфти у протилежному напрямку, кульки 3 виштовхуються боковими поверхнями пазів 4 і 5 півмуфт 1 та 2 у кільцевий паз 6. Ковзаючи по кільцевому пазу 6, кульки 3 порушують зв'язок і переводять муфту в режим холостого ходу. Автоматичне роз'єднання валів відбувається і у випадку, коли з технічних причин або за технологічним процесом ведена півмуфта 2 матиме більшу кутову швидкість ніж ведуча півмуфта 1, тобто передача потужності у зворотному напрямку є неможливою.

Попередній аналіз виявив, що найбільш слабким місцем кулькових муфт є форма периферійних кінців пазів півмуфт, яка передає обертальний момент від ведучої до веденої ланки. Величина напружень та їх вид залежать від характеру контакту кульок з периферійними поверхнями пазів півмуфт. Тому форма пазів, особливо їх периферійних кінців в значній мірі впливає на розподіл навантаження контактуючих елементів, що дотикаються по різних поверхнях, або в точках. Максимальну площу поверхні контакту можна отримати при сферичних кінцях пазів. В цьому випадку радіус сфери паза повинен бути близьким до радіуса кульки. Тоді, враховуючи величину зазору між півмуфтами, контактною поверхнею буде майже повна половина поверхні кульки. Розрахункова схема зусиль, що діють на кульку у зачепленні наведена на рис. 2.

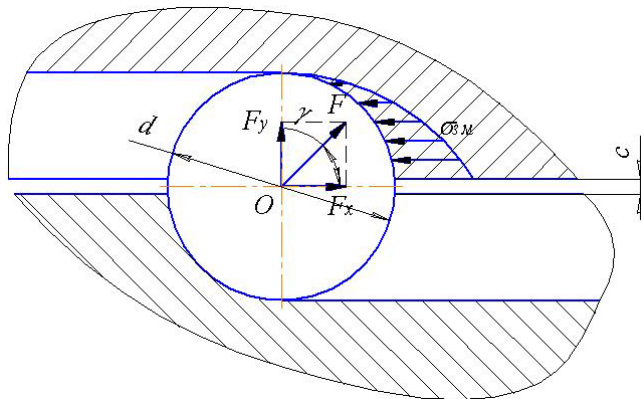


Рисунок 2 – Сили, що діють на кульку в зачепленні

Розглянемо випадок, коли у зачепленні знаходиться три, чи більше кульок. Для розрахунку можна припустити, що осьова сила F_y , яка діє з боку кульки на ведену півмуфту, розподіляється симетрично по колу з радіусом R (рис. 3).

Для розрахунку кулькової муфти вільного ходу використаємо класичну відому теорію, що дозволяє розраховувати півмуфти на міцність, як круглі пластинки постійної товщини h з центральним отвором, які симетрично навантажені осьовою силою [6, 7].

Відомо, що в такому випадку в перерізах елемента півмуфти, що обмежується кутом $d\varphi_0$, діють поперечна сила Q і згинальні моменти M ,

і M_θ . Нормальні напруження σ_r і σ_θ змінюються по товщині півмуфти також за лінійним законом, а їх максимальні значення біля поверхонь півмуфти визначаються за наступними формулами [6, 7]:

$$\sigma_r = \pm \frac{6M_r}{h^2}; \quad \sigma_\theta = \frac{6M_\theta}{h^2}. \quad (1)$$

де M_r , M_θ - згинальні моменти, що віднесені до одиниці довжини елемента півмуфти (плюс відноситься до нижньої сторони півмуфти).

Для розв'язку поставленої задачі, спочатку визначимо початкові параметри з граничних умов на краях півмуфти. Оскільки півмуфти защемлені по внутрішньому радіусу r отримаємо:

$$w(r) = M_j = 0; F_i = F_x; M_r(r_1) = 0, \quad (2)$$

де F_i , M_r - зусилля і моменти, якими навантажена півмуфта; $w(r)$ - прогин півмуфти (вверх).

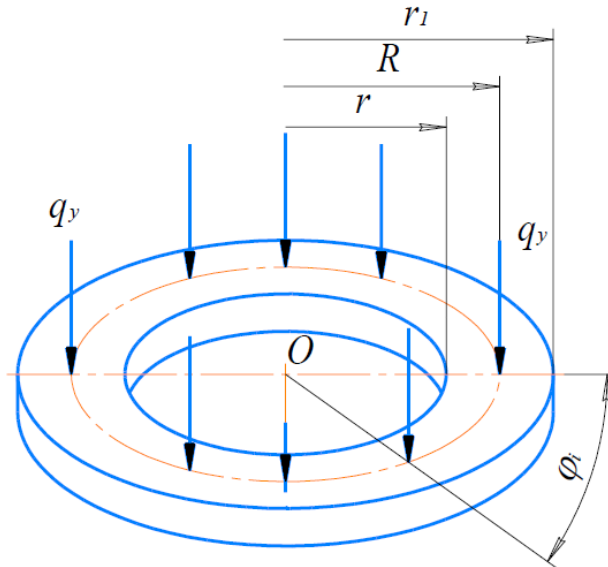


Рисунок 3 – Схема навантаження півмуфти розподіленим осьовим навантаженням

Використовуючи загальні рівняння розрахунку круглих пластинок [6, 7] для даного випадку отримаємо розв'язок у вигляді наступної системи:

$$\left. \begin{aligned} F_i &= F(r) + \delta F_y; \\ M_r &= \phi_{21}F(r) + \phi_{22}M(r) + \delta\phi_{21}(R)F_y; \\ M_\theta &= \phi_{31}F(r) + \phi_{32}M(r) + \delta\phi_{31}(R)F_y; \\ w &= w(r) + \phi_{51}F(r) + \phi_{52}M(r) + \delta\phi_{51}(R)F_y; \\ F_y &= 2\pi R q_y, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де, коефіцієнт $\delta = 0$ при $r_i < R$ і $\delta = 1$ при $r_i \geq R$; q_y - розподілене по радіусу R навантаження півмуфти; $\phi_{ij}(r)$ – функції впливу, які визначаються за наступними виразами [6]:

$$\begin{aligned}
\phi_{21} &= \frac{1}{8\pi} \left\{ 2(1+v) \ln \frac{r_i}{r} + (1-v) \left[1 - \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right] \right\}; \\
\phi_{22} &= \frac{1}{2} \left[1 + v + (1-v) \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right]; \\
\phi_{31} &= \frac{1}{8\pi} \left\{ 2(1+v) \ln \frac{r_i}{r} - (1-v) \left[1 - \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right] \right\}; \\
\phi_{32} &= \frac{1}{2} \left[1 + v - (1-v) \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right]; \\
\phi_{51} &= \frac{r^2}{8\pi D} \left\{ \left[1 + \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right] \ln \frac{r_i}{r} + 1 - \left(\frac{r_i}{r} \right)^2 \right\}; \\
\phi_{52} &= \frac{r^2}{4D} \left[\left(\frac{r}{r_i} \right)^2 - 1 - 2 \ln \frac{r_i}{r} \right],
\end{aligned} \tag{4}$$

де $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – циліндрична жорсткість при згині пластинки; r_i – змінний радіус; ν – коефіцієнт Пуассона.

Визначимо початкові параметри, виходячи з граничних умов на краях пластинки:

при $F(r_1) = 0$ маємо $F(r_1) = F(r) + F_y = 0$; $F(r) = -F_y$;

при $M_r(r_1) = 0$, отримаємо

$$\begin{aligned}
M_r(r_1) &= \phi_{21}(r_1)F(r) + \phi_{22}(r_1)M_r(r) - \phi_{21}(R)F_y = \\
&= F_y[\phi_{21}(r_1) - \phi_{21}(R)] + \phi_{22}(r_1)M_r(r) = 0.
\end{aligned} \tag{5}$$

Використовуючи функції впливу (4), із останнього рівняння отримаємо

$$M_r(r) = F_y \frac{\left\{ 2(1+v) \left(\ln \frac{R}{r} - \ln \frac{r_1}{r} \right) + (1-v) \left[\left(\frac{r}{r_1} \right)^2 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \right\}}{4\pi \left[1 + v + (1-v) \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 \right]}. \tag{6}$$

Враховуючи початкові параметри, систему рівнянь (3) зводимо до вигляду:

$$\left. \begin{aligned}
F(r) &= -F_y; \\
F(r_1) &= F(r) + F_y = 0; \\
M_r &= F_y[\phi_{21} - \delta\phi_{21}(R)] + \phi_{22}M_r(r); \\
M_\theta &= F_y[\phi_{31} - \delta\phi_{31}(R)] + \phi_{32}M_r(r); \\
w &= F_y[\phi_{51} - \delta\phi_{51}(R)] + \phi_{52}M_r(r).
\end{aligned} \right\} \tag{7}$$

Після підстановки функцій впливу (4) у рівняння системи (7), отримаємо формули для визначення згинальних моментів і величини прогину веденої півмфти:

$$\begin{aligned}
M_r &= \frac{F_y}{8\pi} \left\{ 2(1+v) \left(\ln \frac{r_i}{r} - \delta \ln \frac{R}{r} \right) + (1-v) \left[\delta \left(\frac{r}{R} \right)^2 - \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right] \right\} + \\
&+ \frac{M_r(r)}{2} \left[1 + v + (1-v) \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right];
\end{aligned}$$

$$M_{\theta} = \frac{F_y}{8\pi} \left\{ 2(1+v) \left(\ln \frac{r_i}{r} - \delta \ln \frac{R}{r} \right) - (1-v) \left[\delta \left(\frac{r}{R} \right)^2 - \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right] \right\} +$$

$$+ \frac{M_r(r)}{2} \left[1+v - (1-v) \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right];$$

$$w = \frac{F_y r^2}{8\pi D} \left\{ \left[1 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \ln \frac{r_i}{r} + 1 - \left(\frac{r_i}{r} \right)^2 \right\}$$

$$- \delta \left\{ \left[1 + \left(\frac{R}{r} \right)^2 \right] \ln \frac{R}{r} + 1 - \left(\frac{R}{r} \right)^2 \right\} +$$

$$+ \frac{M_r(r) r^2}{4D} \left[\left(\frac{r}{r_i} \right)^2 - 1 - 2 \ln \frac{r_i}{r} \right]. \quad (8)$$

Найбільші згинальні моменти діють у місці закріплення пластинки, тобто у разі $r_i = r$:

$$M_r(r) = F_y \frac{\left\{ 2(1+v) \left(\ln \frac{R}{r} - \ln \frac{r_1}{r} \right) + (1-v) \left[\left(\frac{r}{r_1} \right)^2 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \right\}}{4\pi \left[1+v + (1-v) \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 \right]}, \quad (9)$$

$$M_{\theta}(r) = \frac{F_y v}{4\pi} \frac{\left\{ 2(1+v) \left(\ln \frac{R}{r} - \ln \frac{r_1}{r} \right) + (1-v) \left[\left(\frac{r}{r_1} \right)^2 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \right\}}{\left[1+v + (1-v) \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 \right]}. \quad (10)$$

Найбільші прогини виникають біля зовнішнього краю пластинки, тобто у разі $r_i = r_1$:

$$w(r_1) = \frac{F_y r^2}{8\pi D} \left\{ \left[1 + \left(\frac{r_1}{r} \right)^2 \right] \ln \frac{r_1}{r} + 1 - \left(\frac{r_1}{r} \right)^2 \right\}$$

$$- \left\{ \left[1 + \left(\frac{R}{r} \right)^2 \right] \ln \frac{R}{r} + 1 - \left(\frac{R}{r} \right)^2 \right\} +$$

$$+ \frac{F_y r^2}{16\pi D} \frac{\left\{ 2(1+v) \left(\ln \frac{R}{r} - \ln \frac{r_1}{r} \right) + (1-v) \left[\left(\frac{r_1}{r} \right)^2 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \right\}}{\left[1+v + (1-v) \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 \right]} \left[\left(\frac{r_1}{r} \right)^2 - 1 - 2 \ln \frac{r_1}{r} \right]. \quad (11)$$

Отримані рівняння (9)...(11) мають суттєве значення для розв'язання прикладної задачі з визначенням основних характеристик кулькових муфт вільного ходу у випадку одночасного зачеплення кількох кульок.

Як приклад, розрахуємо розроблену кулькову муфту вільного ходу з такими геометричними розмірами: закріплення півмуфти відбувається по радіусу $r = 10$ мм; коефіцієнт Пуассона для сталі $\nu = 0,3$ (інші розміри наведені вище).

Циліндрична жорсткість пластинки в даному випадку дорівнює

$$D = \frac{2,1 \cdot 10^{11} (1,5 \cdot 10^{-3})^3}{12(1-0,3^2)} = 64,9 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

За формулами (9) і (11) визначаємо найбільші згинальні моменти у місцях закріплення півмуфт:

$$M_r(r) = -26,34 \text{ (Н·м)}; \quad M_\theta(r) = -7,9 \text{ (Н·м)}.$$

Найбільший прогин біля зовнішнього краю півмуфти від дії осьової сили за формулою (11) дорівнює

$$w(r_1) = 6,993 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Отриманий прогин півмуфти настільки малий, що ним можна знехтувати. Максимальні значення нормальних напружень у поперечному перерізі півмуфти визначимо за системою рівнянь (1):

$$\sigma_r = \frac{6 \cdot 26,3358}{(1,5 \cdot 10^{-3})^2} = 70,23 \text{ МПа}; \quad \sigma_\theta = \frac{6 \cdot 7,9}{(1,5 \cdot 10^{-3})^2} = 21,07 \text{ МПа}.$$

Для забезпечення міцності муфти вільного ходу ці напруження порівнюють з допустимими, і підбирають найбільш доцільний матеріал для виготовлення півмуфт. Найбільші прогини півмуфт не повинні перевищувати 10% діаметра кульки. У протилежному випадку товщину півмуфти потрібно збільшити, або закріпити півмуфту за допомогою додаткового елемента в осьовому напрямку.

Висновки

У статті запропоновано методику розрахунку на міцність однієї з конструкцій кулькових муфт вільного ходу, що дозволяє рекомендувати вибір основних елементів даних муфт до застосування у приводах машин та механізмів. За даною методикою можна розраховувати робочі поперечні зусилля, згинальні моменти та осьові деформації основних елементів кулькових муфт, а також оцінювати міцність окремих її елементів.

Список використаних джерел

1. V. Malaschtchenko, J. Homuschin, O. Sorokivskiy Vol'nobezna qulbekova spojka. Strojarstvo Srojirenstvi, № 12, 2001. — С. 56—58 (Slovinsko).
2. Malaschtchenko V., Sorokivskiy O. The Selection of Parameters of a Coaster Ball clutch and Recommendation for its Construction. Transactions of the Universities of Kosic, № 2, 2002. — С. 1—6 (Slovinsko).
3. Малащенко В.О., Гащук П.М., Сороківський О.І., Малащенко В.В. Кулькові механізми вільного ходу.- Львів: Новий Світ – 2000, 2012.- 212 с.
4. Малащенко В.О., Сороківський О.І. Навантаження півмуфт кулькової муфти вільного ходу зосередженою осьовою силою. Машинознавство, №3, 2002. — С. 46-48.
5. Малащенко В. О. Муфти приводів. Конструкції та приклади розрахунків.— Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2009. — 214 с.

6. Биргер И.А. и др. Расчет на прочность деталей машин: Справочник/ И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.

7. Писаренко Г.С. Опір матеріалів: Підручник/ Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський.- 2-е вид., допов. і перероб.- К.: Вища школа, 2004.- 655 с.

8. Нагорняк С.Г., Романець А.А. Синтез кулачкових запобіжних муфт центральним підтиском// Вісн. ТДТУ імені Пулюя.- Тернопіль: ТДТУ, 1999.- Т. 4, №4.- С. 108-111.

9. Пат. 130425А Україна, МКИ F16D41/30. Муфта вільного ходу. Борис А.О., Малащенко В.О. Опубл. 10.12.2018. Бюл. № 23.

10. Пат. 28884А Україна, МКИ F16D41/06. Кулькова муфта вільного ходу. Малащенко В.О., Сороківський О.І. Опубл. 29.12.99. Бюл. № 8.

11. Патент на корисну модель №136495u Україна. Муфта вільного ходу. Сороківський О.І. Опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16.

LOADING OF THE MAIN ELEMENTS OF FREEWHEEL BALL COUPLINGS

Malashchenko V. O., Sorokivskyi O. I.
Lviv Polytechnic National University

Abstract. *The article examines the design features of the freewheel ball coupling and the principle of its operation. A methodology for calculating transverse forces, bending moments and axial deformations of the main elements of the ball coupling is proposed. The given materials allow designers to rationally choose the materials for manufacturing and the main geometric parameters of the given freewheel ball coupling.*

Key words: *coupling, freewheel coupling, stress, half-coupling, half-coupling connection.*