УДК 621.833.65

Стрілець О. Р., к.т.н, доцент, Стрілець В. М., к.т.н., професор, Степанюк А. А., к.т.н., асистент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

СИЛОВІ ПАРАМЕТРИ ПРУЖНОЇ ЗАПОБІЖНОЇ МУФТИ З ЗІРКОПОДІБНОЮ ПРУЖИНОЮ З КРУГОВИМИ ВИСТУПАМИ

Описана будова запобіжної муфти з зіркоподібною пружиною з виступами кругової форми і принцип її роботи. Приведений геометричний синтез зіркоподібної пружини з виступами кругової форми в залежності від розмірів півмуфт. Прийнято, що виступ зіркоподібної пружини являє собою арку і для неї, методами будівельної механіки проведені розрахунки. Отримані аналітичні вирази дозволяють робити висновки про роботоздатність муфти при передачі нею обертального моменту.

Ключові слова: **муфта запобіжна пружна, зіркоподібна пружина, виступ кругової форми, статичний розрахунок, деформація, коло.**

Постановка проблеми. В приводах підйомно-транспортних, будівельних, дорожніх, меліоративних та інших машин широко використовуються різні муфти, які є достатньо відповідальними механічними пристроями, що часто визначають надійність і довговічність всієї техніки. Основне призначення муфт – це з'єднання валів і передавання обертальних моментів. Окрім вказаного, запобіжні пружні муфти виконують і такі відповідальні функції: компенсують шкідливий вплив зміщення геометричних осей кінців валів, що виникають унаслідок неточностей виготовлення, монтажу або конструктивних особливостей і умов експлуатації приводів; амортизацію вібрацій, поштовхів та ударів, що виникають під час роботи; захист деталей від перенавантажень; полегшення пуску машини. Різноманітні експлуатаційні функції сприяли розробці великої кількості конструкцій муфт. Але у всіх випадках у роботі муфт залишається багато недоліків, які потрібно усувати за рахунок їх удосконалення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній технічній літературі, наприклад [1-3] описані запобіжні муфти кулачкові, зі зрізним штифтом та інші, які через безпосередній контакт півмуфт передають обертальний момент жорстко, а це негативно впливає на роботу деталей приводів і машини в цілому. На основі аналізу недоліків конструкцій цих відомих муфт розроблені конструкції нових за-

побіжних пружних муфт із зіркоподібними пружинами на рівні патентів [4-8]. Однак теоретичні та експериментальні дослідження для нових запобіжних пружних муфт досі не проведені. Частково такі дослідження виконані для муфти з параболічним виступом [9].

Метою роботи є проведення попереднього аналізу силових показників запобіжних пружних муфт, що здійснюються через зіркоподібні пружини. Слід наголосити, що натепер немає методики розрахунків таких муфт. Тому автори і роблять спробу розробити методику їх розрахунків для можливого використання в різних технічних засобах, в тому числі в підйомно-транспортних, будівельних, дорожніх, меліоративних та інших машинах.

Реалізація роботи. У даній статті розглядаються статичні розрахунки зіркоподібних пружин запобіжних пружних муфт [5-9] у робочому стані, тобто під час передавання сталого обертального моменту. Одна з таких муфт показана на рис. 1.

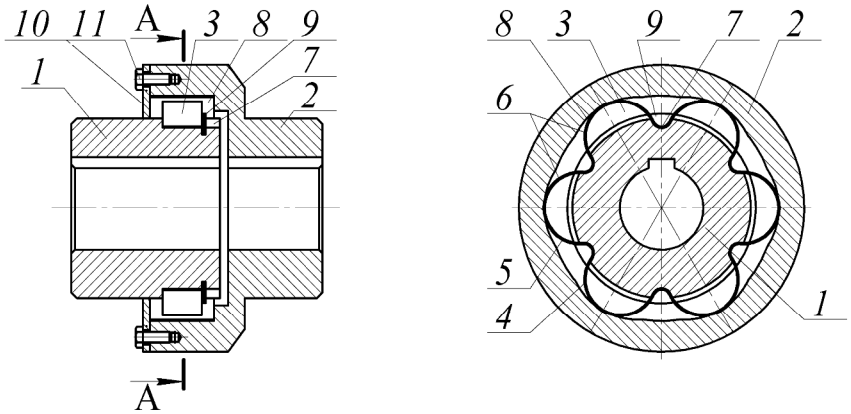

Рис. 1. Схема пружної запобіжної муфти з зіркоподібною пружиною

Муфта запобіжна пружна складається з внутрішньої 1 і зовнішньої 2 півмуфт, з'єднаних між собою зіркоподібною пружиною 3, сторони 4 і 5 виступів 6 якої виконані коловими, встановленою в заглиблення 7 і 8 півмуфт 1 і 2, причому заглиблення 8 виконані з радіусом більшим радіусів заокруглень виступів 6. Положення зіркоподібної пружини 3 зафіксовано на внутрішній півмуфті 1 стопорним кільцем 9. Внутрішній простір муфти закритий кришкою 10, яка прикріплена до півмуфти 2 гвинтами 11 і призначена для захисту зіркоподібної пружини 3 від впливу зовнішніх факторів та її мащення консистентними мастилами.

Муфта запобіжна пружна працює так. При обертанні внутрішньої півмуфти 1, обертальний момент через зіркоподібну пружину 3 та заглибини 7 і 8 передається на зовнішню півмуфту 2. В режимі пе-

ревантаження зіркоподібна пружина 3 деформується, зменшуючись у діаметрі по своєму зовнішньому контуру, при цьому сторони 4 і 5 виступів 6 вигинаються в сторони своїх випуклостей, забезпечуючи деформацію зіркоподібної пружини 3 в межах пружної деформації і виходять із заглиблень 8 зовнішньої півмуфти 2, радіус заокруглень яких більший радіусів заокруглень виступів 6 та проковзують по циліндричній поверхні зовнішньої півмуфти 2 до тих пір поки обертальний момент не зменшиться до номінального значення.

На рис. 2 показана модель пружної муфти з зіркоподібною пружиною, створеної в системі «КОМПАС – 3D», в зібраному (рис. 2, *а*) і в розібраному (рис. 2, *б*) виглядах.

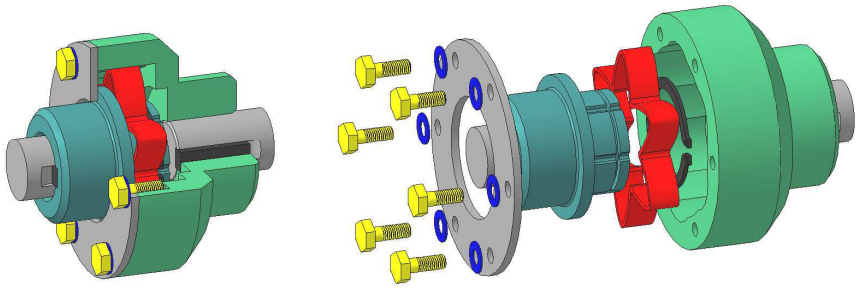

Рис. 2. Моделі запобіжної пружної муфти:
а – в зібраному і *б* – в розібраному виглядах

На рис. 3 показана схема з розмірами в буквеному вигляді для геометричного синтезу зіркоподібної пружини, де D – внутрішній діаметр зовнішньої півмуфти; D_1 – зовнішній діаметр внутрішньої півмуфти; R – радіус колового виступу; l – крок (прольот) колових виступів; h – висота сегмента; r – радіус заглибини у внутрішній півмуфті; R_1 – радіус кола заглибини і δ – висота заглибини у зовнішній півмуфті; z – число виступів.

Зв'язок між цими розмірами описується формулами:

$$l = D_1 \sin\frac{180°}{z}; \quad (1)$$

$$h = R - \sqrt{R^2 - \frac{l^2}{4}}; \quad (2)$$

$$r = \frac{l - 2R}{2}; \quad R_1 = (1{,}8 - 2{,}2)R; \quad (3)$$

$$D = D_1 + R - h - \delta. \quad (4)$$

Діаметр заготовки для виготовлення зіркоподібної пружини буде

$$D_{заг} = (R + r)z\,. \qquad (5)$$

При проектуванні муфт рекомендується приймати конструктивно: $D_1 \geq 1{,}75d$, де d – діаметр вала; $R = (0{,}4 - 0{,}45)l$ і, у більшості випадків, $z = 6$.

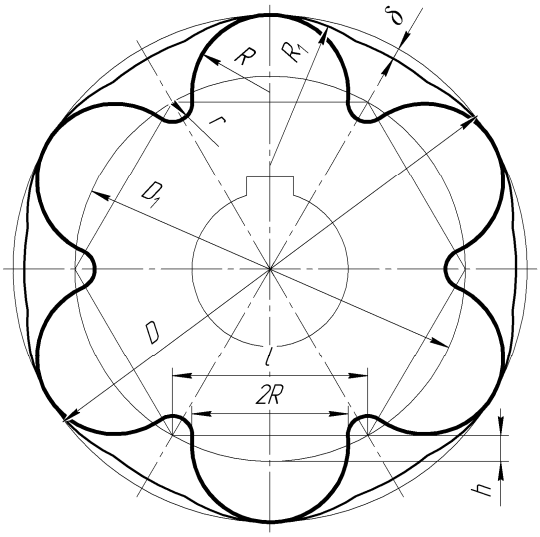

Рис. 3. Схема для геометричного синтезу зіркоподібної пружини з круговими виступами

Поставлена задача розв'язана з такими допущеннями: бічні поверхні виступів зіркоподібних пружин деформуються однаково відносно осі симетрії; навантаження, яке діє на виступи, лежить на лінії симетрії і в площині зіркоподібної пружини перпендикулярній до осі обертання, рівне

$$F = \frac{2T_p}{Dzf}\,, \qquad (6)$$

де T_p – розрахунковий обертальний момент, який передається муфтою; D – внутрішній діаметр зовнішньої півмуфти; z – число виступів зіркоподібної пружини; f – коефіцієнт тертя.

Розглядається один виступ, бо інші деформуються подібно. При розрахунку круговий виступ уподоблюється до кругової двохшарнірної арки і використовується метод Мора [10]. Розрахункова схема виступу зіркоподібної пружини показана на рис. 4 має такі позначення: F – зосереджена сила; R – радіус колового виступу; α – поточний кут нахилу осі кола; b і Δ – розміри поперечного перетину пружини, відповідно ширина і товщина.

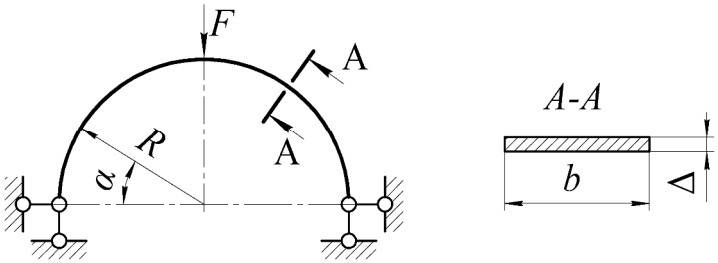

Рис. 4. Розрахункова схема виступу зіркоподібної пружини

Виступ як кругова двохшарнірна арка постійного перетину ($EJ = const$, де E – модуль пружності матеріалу пружини; $J = b\Delta^3/12$ – момент інерції поперечного перетину пружини), навантажена силою F по осі симетрії.

Згідно [10] степінь статичної невизначеності такої двохшарнірної арки дорівнює одиниці. Застосуємо метод сил. В якості еквівалентної системи приймемо статично визначену кругову арку. Відкинуту горизонтальну в'язь замінимо невідомим $X_1 = 1$ (рис. 5, *а*). Основна система методу сил показана рис. 5, *б*.

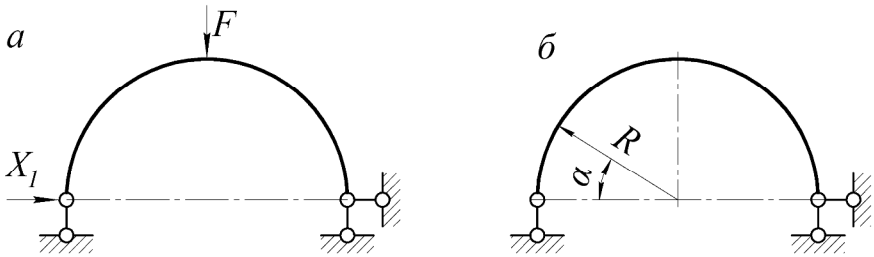

Рис. 5. Еквівалентна (*а*) і основна (*б*) системи виступу зіркоподібної пружини

Момент M_1 від сили X_1 виразиться аналітичною формулою

$$M_1 = X_1 R \sin\alpha. \tag{7}$$

Сила F в основній системі створює момент

$$M_F = \frac{FR}{2}(1-\cos\alpha). \tag{8}$$

Епюри моментів від сил $X = 1$ і F показані на рис. 6.

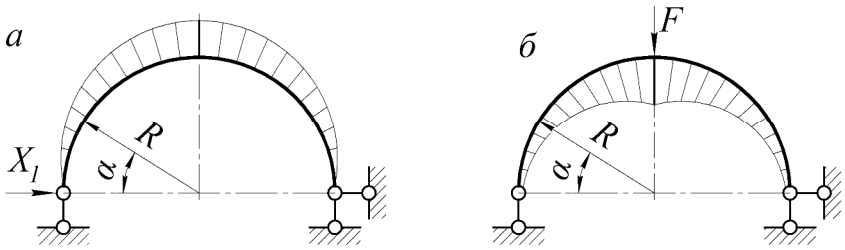

Рис. 6. Епюра моментів від $X=1$ і від сили F

Канонічне рівняння методу сил

$$X_1\delta_{11}+\delta_{1F}=0. \tag{9}$$

Для визначення величин δ_{11} і δ_{1F} використаємо метод Мора нехтуємо впливом поперечних і поздовжніх сил, тоді:

$$\delta_{11}=\int_S \frac{M_1^2}{EJ}ds \quad \text{і} \quad \delta_{1F}=\int_S \frac{M_1 M_F}{EJ}ds. \tag{10}$$

Виконаємо заміну перемінної S на α:

$$ds=Rd\alpha. \tag{11}$$

Якщо підставити значення (7) і (8) у (10) отримаємо:

$$\delta_{11}=R\int_0^{\pi}\frac{M_1^2}{EJ}d\alpha=\frac{R^3}{EJ}\int_0^{\pi}\sin^2\alpha d\alpha=\frac{\pi R^3}{2EJ}; \tag{12}$$

$$\begin{aligned}\delta_{1F}&=R\int_0^{\pi}\frac{M_1M_F}{EJ}d\alpha=-\frac{FR^3}{EJ}\int_0^{\pi}\sin\alpha(1-\cos\alpha)d\alpha=\\&=-\frac{FR^3}{EJ}\left(\int_0^{\pi}\sin\alpha d\alpha-\int_0^{\pi}\sin\alpha\cos\alpha d\alpha\right)=-\frac{FR^3}{EJ}\end{aligned}. \tag{13}$$

Тоді величина X_1 визначиться

$$X_1=-\frac{\delta_{1F}}{\delta_{11}}=-\frac{2}{\pi}F\cdot \tag{14}$$

Кінцевий загальний вираз для визначення згинального моменту у виступі кругової форми буде

$$M_\Sigma=X_1M_1+M_F=FR\left[-\frac{2}{\pi}\sin\alpha+\frac{1}{2}(1-\cos\alpha)\right]. \tag{15}$$

На рис. 7 показана епюра згинального моменту для кругового виступу зіркоподібної пружини побудована за допомогою виразу (15). Для $\alpha=\pi/2$ момент згину буде $M_\Sigma=-0{,}137\,FR$.

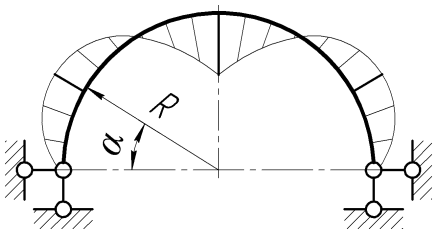

Рис. 7. Епюра згинального моменту для колового виступу

Для визначення переміщення δ використовуємо спосіб Мора і

основну систему (див. рис. 5, *б*). У напрямку переміщення δ прикладаємо одиничну силу (*X*= 1) і від неї будуємо епюру згинального моменту $M_x = R/2$, показану на рис. 8.

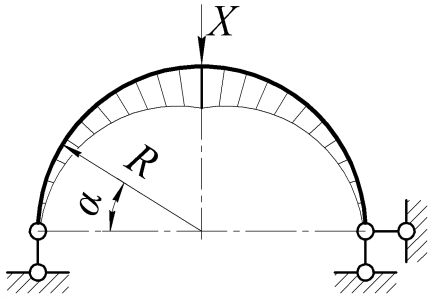

Рис. 8. Епюра згинального моменту M_4, від сил *X*

Далі використовуємо значення моментів M_Σ і M_4, отримуємо:

$$\delta = \frac{FR^2}{2EJ}[(-\frac{2}{\pi}\sin\alpha + \frac{1}{2}(1-\cos\alpha)]\,. \qquad (16)$$

Епюра переміщень у круговому виступі зіркоподібної пружини показана на рис. 9.

Найбільше переміщення на осі симетрії виступу, коли $\alpha = \pi/2$ рівне δ. Тому із (16) можна визначити силу F

$$F = \frac{\delta EJ}{0{,}215\,R^2}\,. \qquad (17)$$

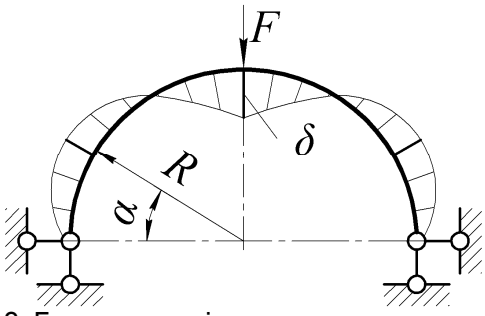

Рис. 9. Епюра переміщень у круговому виступі

Максимальний обертальний момент, який може передати муфта, буде

$$T_{\max} = \frac{\delta EJDzf}{0{,}43R^2}\,. \qquad (18)$$

Величини, які входять у вирази (17) і (18) роз'яснені раніше.

Висновки.

1. Отримана аналітичні залежності (17) між силою і деформацією та (18) – між обертальним моментом і деформацією в зіркоподібній пружині при передачі запобіжною пружною муфтою обертально-

го моменту може використовуватись при проектуванні нових муфт приводів машин.

2. Вираз (15) дозволяє визначити максимальну величину моменту згину для небезпечного перетину зіркоподібної пружини і для нього знайти напруження за відомими формулами.

3. Запропонована методика теоретичного дослідження залежності між силою і деформацією у зіркоподібних пружинах кругової форми може використовуватись для пружин з різним числом виступів і є підґрунтям для подальших досліджень таких запобіжних пружних муфт.

1. Малащенко В. О. Муфти приводів. Конструкції та приклади розрахунків / В. О. Малащенко. – Львів : Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2006. – 196 с. **2.** Bhandary V. B. Design of Machine Elements. New Delhi : Tata McGrew-Hill Education Private Ltd., 2007. – 934 p. **3.** Ganesh Babu K., Srithar K. Design of Machine Elements. 2nd edition. New Delhi: Tata McGrew-Hill Education, 2010. – 544 p. **4.** Пат. 90178 Україна, МПК(2006.01) F16 D 3/52. Муфта запобіжна пружна / В. А. Федорук, В. М. Стрілець, О. Р. Стрілець, А. В. Цимбалюк; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – u№2014 00028, заявл. 08.01.2014; опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9. **5.** Пат. 90494 Україна, МПК(2014.01) F16 D 3/00. Муфта запобіжна пружна / В. А. Федорук, В. М. Стрілець, О. Р. Стрілець, А. В. Цимбалюк; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – u№2014 00313, заявл. 15.01.2014; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10. **6.** Пат. 98075 Україна, МПК(2006.01) F16 D 3/52. Муфта запобіжна пружна / В. М. Стрілець, О. Р. Стрілець, М. М. Козяр, В. А. Федорук; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – u№ 2014 13238, заявл. 10.12.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. **7.** Пат. 98076 Україна, МПК(2006.01) F16 D 3/52. Муфта запобіжна з складеною зіркоподібною пружиною / О. Р. Стрілець, М. М. Козяр, В. А. Федорук, В. М. Стрілець; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – u№2014 13239, заявл. 10.12.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. **8.** Пат. 107981 Україна, МПК(2006.01) F16 D 3/52. Муфта запобіжна пружна / О. Р. Стрілець, В. А. Федорук, В. М. Стрілець, О. В. Лисанець; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – u№2016 00132, заявл. 04.01.2016; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12. **9.** Стрілець В. М. Обґрунтування кінематико-силових параметрів зіркоподібної пружини запобіжної пружної муфти / В. М. Стрілець, О. В. Лисанець, О. Р. Стрілець // Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво / Полтавський наці-

ональний технічний університет імені Юрія Кодратюка. – Полтава : Полт. НТУ, 2015. – Вип. 3(45). – С. 40–46. **10.** Поліщук М. П. Будівельна механіка : навчальний посібник / М. П. Поліщук. – Рівне : НУВГП, 2004. – 237 с.

Рецензент: д.т.н., професор Кравець С. В. (НУВГП)

Strilets O. R., Candidate of Engineering, Associate Professor, Strilets V. M., Candidate of Engineering, Professor, Stepaniuk A. A., Candidate of Engineering, Assistant (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

POWER PARAMETERS OF THE FLEXIBLE OVERLOAD COUPLING WITH STAR-SHAPED SPRING WITH CIRCULAR VERTICES

The article examines the structure of an overload flexible coupling that contains internal and external hubs, connected by a star-shaped spring with the circular vertices inserted in grooves on the outer surface of internal hub and inner surface of the external hub. Position of the star-shaped spring is fixed on the inner hub by retaining ring. During the rotation of inner hub, torque is transferred to the outer hub through star-shaped spring and grooves. In overloading mode, star-shaped spring starts deforming, decreasing in diameter along its outline, with grooves being compressed, within the elastic deformation range, and slipping out of the external hub grooves, which curves radius is larger than one of spring edges, and sliding on the surface of an external hub until torque is over the nominal value. We have conducted a geometric synthesis of star-shaped spring with vertices of circular shape, depending on its size. It had been assumed that star spring vertices are the double-hinge arches of circular form and we conducted calculations of analytical solutions using the methods of structural mechanics.

Analytical expressions obtained allow drawing conclusions about workability of the star-shaped spring of flexible overload coupling during the torque transmission.

Keywords: **flexible overload coupling, star-shaped spring, vertices, statics calculation, deformation, circular.**

Стрилец О. Р., к.т.н., доцент, Стрилец В. Н., к.т.н, професор, Степанюк А. А., ассистент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ МУФТЫ С ЗВЕЗДООБРАЗНОЙ ПРУЖИНОЙ С КРУГОВЫМИ ВЫСТУПАМИ

Описано строение предохранительной муфты с звездообразной пружиной с выступами круговой формы и принцип её работы. Приведен геометрический синтез звездообразной пружины в зависимости от размеров полумуфт. Принято, что выступ звездообразной пружины являет собой арку и для неё, методами строительной механики проведены расчеты. Полученные аналитические выражения позволяют делать выводы о работоспособности муфты при передачи ею крутящего момента.
Ключевые слова: **муфта предохранительная упругая, звездообразная пружина, круговой выступ, статический расчет, деформация, окружность.**