

<https://doi.org/10.23939/istcipa2023.57>.

ВИКОРИСТАННЯ ВАРІАЦІЙНОГО ФОРМУЛЮВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРИБОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ТРАНСПОРТНИХ МАШИН

© Стоцько З. А., Демків І. І., Кузін О. А., Кузін М. О., 2023

Постановка проблеми та мета роботи. Проблема управління довговічністю трибоспрямижень для тіл, матеріали яких є гетерогенними системами, є ще не вирішеним завданням. Мета роботи полягає у розробці математичних підходів для пошуку розв'язання цієї проблеми на прикладі антифрикційних матеріалів на основі свинцевого бабіту. **Методика роботи.** В роботі використане математичне моделювання, авторські методики розрахунку «осереднених» властивостей для нелокальних середовищ, підходи розрахункової трибології. **Результати статті.** Встановлено оптимальний вміст твердої структурної складової матеріалу, при якому максимально підвищується зносотривкість вкладок підшипників ковзання. **Наукова новизна.** Сформовано методологічний підхід до проблеми управління експлуатаційними параметрами підшипників ковзання. **Практичне значення досліджень за тематикою статті.** Розроблена методика дає змогу чисельно визначати вміст складових бінарних гетерогенних систем, при яких підвищуються їх експлуатаційні параметри. **Напрямки подальших досліджень за тематикою статті.** Подальші дослідження можуть бути спрямовані на пошук оптимальних механічних параметрів зони «інтерфейсу» взаємодії між твердою і м'якою структурними складовими у матеріалі.

Ключові слова: підшипники ковзання, вузли тертя, принцип Шарпі, бабіти, механіка гетерогенних середовищ, варіаційна задача

Вступ

Розв'язання сучасної проблеми підвищення терміну експлуатації машин та механізмів, економії матеріалу та часу роботи ремонтного персоналу в значній мірі залежить від трибологічної надійності вузлів тертя [1]. Відомо, що значна частина (до 30%) енергетичних ресурсів витрачається на тертя, при цьому 70..80% рухомих спряжень виходять із ладу внаслідок зношування [2]. Важливою ця проблема є і для транспортних систем. Так, згідно відкритої статистики, вузли тертя на 80..90% визначають ефективність та надійність роботи залізничної техніки, а втрати, які обумовлені зношуванням у трибологічних контактних парах, складають до 10..30% ресурсів, що витрачаються на тягу поїздів [3].

Тому проблема розробки підходів, що дозволяють підвищувати довговічність контактних пар транспортних машин та обладнання є актуальною, і відноситься до найбільш важливих у сучасному машинобудуванні.

Аналіз літературних джерел

Одним із ефективних способів оцінки таких трибологічних параметрів вузлів як зносотривкість, довговічність, контактна міцність є розв'язання відповідних трибоконттактних задач [1]. Постановка і розв'язання таких задач достатньо добре розвинуті, особливо для тіл, матеріал яких мо-

жна представити як континуально ізотропний та гомогенний. В цьому випадку можна використовувати добре відомий апарат теорії функції комплексної змінної, який почав розвиватись ще із 30-х років минулого століття. В результаті впровадження цього математичного апарату в практику вирішення інженерних розрахункових задач були отримані рівняння, які із достатньою для практики точністю дозволяють оцінювати ресурс конструкцій в умовах тертя та зношування [4].

Складнощі для розрахунку починають виникати тоді, коли матеріал, що використовується для елементів трибоспряджень, не задовольняє умовам ізотропності або гомогенності. Одним із таких матеріалів є бабіти, які використовуються у підшипниках ковзання. Основною їх експлуатаційною перевагою є достатня дешевизна та можливість повторного використання. З трибологічної точки зору, зносотривкість даних матеріалів забезпечується завдяки тому, що вони задовольняють правилу (принципу) Шарпі, згідно якого матеріал підшипників ковзання має містити тверді складові, що розподілені у пластичній масі. При такій будові тиск передається на тверді частинки, що мають невисокий коефіцієнт тертя, а пластична складова перерозподіляє навантаження вглибину матеріалу [5].

Постановка задачі управління трибологічними параметрами матеріалів такого типу на даний час є відкритою і не до кінця вирішеною.

Мета

Метою статті є розробка математичних підходів для розв'язання проблеми підвищення експлуатаційних параметрів підшипників ковзання на основі бабітів з використанням сучасних підходів механіки гетерогенних середовищ та розрахункової трибології.

Методика проведення дослідження

У роботі використане математичне моделювання, авторські методики розрахунку «осереднених» властивостей для нелокальних середовищ, підходи розрахункової трибології.

Результати дослідження та їх обговорення

Розглянемо технологію отримання вкладок підшипників ковзання тягових двигунів електровозів. У процесі виготовлення і ремонту вузлів тертя використовують метод відцентрового лиття.

Ця технологія дає можливість отримувати вироби високої якості: з меншим ступенем забрудненості неметалевими включеннями, без газових дефектів, усадкових раковин і порожнин. Для виготовлення вкладок підшипників ковзання широко використовують установки відцентрового лиття з горизонтальною віссю обертання.

Відцентрові сили суттєво впливають на формування структури тому, що до складу бабіту входять фази з різними фізико-хімічними властивостями. Хімічний склад бабіту Б16, який був досліджений, наведено в таблиці.

Хімічний склад бабіту Б16

Sb, %	Cu, %	Sn, %	Pb, %
15- 17	1,5-2	15-17	Основа

Фазовий склад сплаву складається з фаз типу: тверді включення – кристали призматичної форми $SnSb$, Cu_3Sn ; матриця – евтектика $\alpha(Pb) + \beta(SnSb)$. Ці фази різняться за своєю питомою вагою: $SnSb - 6,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $Cu_3Sn - 7,86 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $Pb - 11,34 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Різниця в густині приводить до того, що на частинки свинцю і зміцнювальної фази діє різне значення відцентрової сили. Аналітичний розрахунок, проведений для вкладиша підшипника діаметром $229 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, свідчить, що при мінімальній кількості обертів форми $n_{\min} = 177 \text{ об/хв}$ кутова швидкість дорівнює $\omega = 18,5 \text{ с}^{-1}$.

Відцентрову силу обчислювали за формулою $Q = m \cdot \omega^2 \cdot r$, де m – маса частинки, на яку діє відцентрова сила; ω – кутова швидкість; r – віддаль від осі обертання. Для *SnSb* відцентрова сила буде мати таке значення: $2,4317 \cdot 10^{-9}$ Н, для *Cu₃Sn* – $2,9577 \cdot 10^{-9}$ Н, для *Pb* – $4,3673 \cdot 10^{-9}$ Н. Отримані результати свідчать, що частинки свинцю під дією відцентрової сили виштовхуються на зовнішній радіус вкладиша, а частинки зміцнювальної фази *SnSb* – на внутрішній радіус вкладиша, частинки *Cu₃Sn* займають проміжне положення між частинками *Pb* і *SnSb*. Таким чином структура стає неоднорідною через те, що значення відцентрової сили для *Pb* в 1,79 раз вище за відцентрову силу для *SnSb* і в 1,47 рази за відцентрову силу для *Cu₃Sn*.

Зрозуміло, що формування матеріалу деталей зі структурою, яка характеризується суттєвою неоднорідністю, призводить також і до змін трибологічних властивостей.

Основним завданням є дослідження таких параметрів мікроструктури, що забезпечують максимальне подовження часу роботи вузла тертя при відомих навантаженнях на нього.

Для цього розглянемо таку математичну постановку задачі.

Априорі приймемо, що базові механічні властивості – модуль пружності та коефіцієнт Пуасона матеріалу (деталей підшипникових вузлів) залежать від процентного вмісту твердої складової:

$$E = E(\varphi), \quad \mu = \mu(\varphi), \quad (1)$$

де φ – процентний вміст твердої складової.

Зазначимо, що це априорне припущення про залежність модуля пружності та коефіцієнта Пуасона від вмісту складових є основною для механіки гетерогенних та композиційних матеріалів [6].

Контурний тиск, фактичний тиск, лінійну інтенсивність зношування будемо визначати із співвідношень І. В. Крагельського [7].

Контурний тиск дорівнює:

$$P_c = 0.2 \cdot E^{0.8} \left(\frac{H_\beta}{R_\beta} \right) \cdot P_a^{0.2}, \quad (2)$$

де E – модуль пружності; H_β – висота хвилі; R_β – радіус хвилі; P_a – номінальний тиск.

Фактичний тиск дорівнює:

$$P_r = 0.5 \cdot E^{\frac{2V}{2V+1}} \cdot \Delta^{\frac{V}{2V+1}} \cdot P_c^{\frac{1}{2V+1}}, \quad (3)$$

де Δ – комплексна характеристика шорсткості; V – параметр поверхні.

Лінійна інтенсивність зношування рівна:

$$I = K_1 \cdot \alpha \cdot 2^{\frac{1}{2V}} \cdot P_a^{\frac{1}{2V}} \cdot P_c^{\frac{1}{2V}} \cdot P_r^{t-1-\frac{1}{2V}} \cdot \Delta^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{k \cdot f_M}{\sigma_0} \right)^{t_y}, \quad (4)$$

де K_1 – стала, що залежить від геометрії нерівностей; α – коефіцієнт перекриття; σ_0 – параметр фрикційної втоми; f_M – молекулярна складова сили тертя.

Після підстановки поліномів (1) в рівняння (2), (3) і цих результатів в (4) отримаємо функціональну залежність лінійної інтенсивності зношування від процентного вмісту складових $I = I(\varphi)$.

Визначення процентного вмісту складових бінарних гетерогенних металічних систем, при яких зменшується лінійна інтенсивність їх зношування, проводимо за такою схемою: 1) прирівнюємо

до нуля першу похідну функціональної залежності $I(\varphi) \frac{dI(\varphi)}{d\varphi} = 0$ і знаходимо множину

$\varphi^* = \{\varphi_1, \dots, \varphi_N\}$; 2) перевіряємо серед множини значень φ^* ті, які задовільняють умову мінімуму -

$\frac{d^2 I(\varphi)}{d\varphi^2} > 0$, і формуємо з цих значень множину оптимальних розв'язків $\varphi_{opt} = \{\varphi_1, \dots, \varphi_m\}$. Серед значень множини φ_{opt} знаходимо ті, що забезпечують абсолютний мінімум функції $I(\varphi)$ при $\varphi \in (0;1)$, яке і буде оптимальним значенням процентного вмісту складових бінарних гетерогенних металічних систем, при яких підвищується їх зносотривкість.

Для встановлення залежностей $E(\varphi)$, $\mu(\varphi)$ були використані підходи механіки гетерогенних середовищ [6].

Зокрема, на основі емпіричних даних, авторської розрахункової методики на основі методу скінчених елементів [8] були отримані такі залежності модуля пружності та коефіцієнта Пуасона від процентного вмісту твердої складової:

$$E(\varphi) = 32.2100 - 2.2415 \cdot \varphi + 0.2617 \cdot \varphi^2 - 0.0114 \cdot \varphi^3 + 0.0002 \cdot \varphi^4 - 1.4175 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi^5, \quad (5)$$

$$\mu(\varphi) = 0.5739 - 0.0309 \cdot \varphi + 0.0023 \cdot \varphi^2 - 0.8202 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi^3 + 0.1319 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi^4 - 0.7867 \cdot 10^{-8} \cdot \varphi^5, \quad (6)$$

де φ – процентний вміст твердої складової.

При їх підстановці у формули (2) – (4) отримаємо рівняння залежності величини зношування від процентного вмісту твердої складової $I = I(\varphi)$. Проведемо його оптимізацію за процентним вмістом твердої складової. В результаті отримаємо значення $\varphi = 56.3445\%$, при якому спостерігається підвищення зносотривкості вкладок підшипників ковзання.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили отримані розрахункові результати [9].

Висновки

1. У роботі розглянута проблема оптимізації трибологічних параметрів сплавів, розроблених на основі принципу Шарпі, які широко використовують у процесі виготовлення вузлів тертя ковзання.
2. З використанням підходів механіки гетерогенних середовищ та рівнянь контактної трибології авторами запропоновано методику визначення оптимального вмісту складових бінарних гетерогенних металічних систем, при яких підвищується їх довговічність в умовах тертя ковзання.
3. Визначено, що при вмісті твердої складової на рівні 56.34% максимально підвищується зносотривкість вкладок підшипників ковзання із свинцевого бабіту.

Список літератури

1. Чернець М., Корнієнко А., Чернець Ю., Федорчук С. Методологія розрахунку зубчастих передач: контактна міцність, зношування, довговічність. Т. 1. – К.: НАУ, 2020. – 137 с.
2. Applied tribology bearing design and lubrication. 3-d Edition. – John Wiley & Sons Ltd, 2017. – 656 p.
3. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка). – М.: Эко-Пресс, 2010. – 604 с.
4. Чернець М.В., Романенко Є.О., Корнієнко А.О., Чернець Ю.М. Методологічні основи розрахунку металевих і металополімерних підшипників ковзання: контактна міцність, зношування, довговічність. – К.: НАУ, 2022. – 283 с.
5. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. – К.: Наук. думка, 1990. – 264 с.
6. Advanced Composite Materials: Properties and Applications. – 2017. – 594 p.
7. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
8. Кузін М.О. Імітаційні моделі структури для розрахунку параметрів ферито-перлітних сталей з підвищеною зносостійкістю. *Наукові записки. Українська академія друкарства*. – 2007. – № 1(11). – с. 15-22.
9. Кузін О.А., Курило І.В., Кузін М.О. Роль структури в процесах зношування бабіту Б16// *Металознавство та обробка металів*. – 2007. – № 4. – С. 14–18.

Zinoviy Stotsko¹, Ihor Demkiv¹, Oleg Kuzin, Mykola Kuzin^{1,2}¹ Lviv Polytechnic National University² Lviv Research Institute of Forensic Expertise

USE OF VARIATION FORMULATION FOR OPTIMIZATION OF TRIBOLOGICAL PARAMETERS OF SLIDING BEARINGS OF VEHICLES

Problem statement and the research purpose. The problem of managing the durability of tribocouplings for bodies whose materials are heterogeneous systems is currently an open problem. The purpose of the work is to develop mathematical approaches for finding a solution to this problem using the example of antifriction materials based on lead babbitt. **Methodology of the study.** The work uses mathematical modeling, author's methods of calculating "averaged" properties for non-local environments, computational tribology approaches. **Results of the investigations.** The optimal content of the solid structural component of the material was established, at which the wear resistance of the sliding bearing inserts is maximally increased. **Scientific novelty.** In the work, a methodological approach to the problem of managing the operational parameters of sliding bearings is formed. **Practical value of the results.** The developed technique makes it possible to numerically determine the content of the components of binary heterogeneous systems, which increase their operational parameters. **Scopes of further investigations on the subject of the paper.** Further research can be directed to the search for optimal mechanical parameters of the "interface" zone of interaction between the hard and soft structural components in the material.

Key words: sliding bearings, friction nodes, Charpy's principle, babbitt, mechanics of heterogeneous media, variational problem

References

1. Chernets M., Kornienko A., Chernets Yu., Fedorchuk S. Methodology for calculating gears: contact strength, wear, durability. Volume 1. - K.: NAU, 2020. - 137 p. [in Ukrainian]
2. Applied tribology bearing design and lubrication. 3-d Edition. - John Wiley & Sons Ltd, 2017. – 656 p. (doi: 10.1002/9781118700280)
3. Drozdov Yu.N., Yudin E.G., Belov A.I. Applied tribology (friction, wear, lubrication). – M.: Eco-Press, 2010. – 604 p. [in Russian]
4. Chernets M.V., Romanenko E.O., Kornienko A.O., Chernets Yu.M. Methodological bases of calculation of metal and metal-polymer sliding bearings: contact strength, wear, durability. - K.: NAU, 2022. - 283 p. [in Ukrainian]
5. Dictionary-reference book on friction, wear and lubrication of machine parts. – K.: Science. Dumka, 1990. – 264 p. [in Russian]
6. Advanced Composite Materials: Properties and Applications. – 2017. – 594 p. (doi: 10.1515/9783110574432)
7. Kragelski I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Basics of calculations for friction and wear. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 526 p. [in Russian]
8. Kuzin M.O. Simulation models of the structure for calculating the parameters of ferrite-pearlite steels with increased wear resistance// Scientific notes. Ukrainian Academy of Printing. Scientific and technical collection. - 2007. - No. 1(11). – p. 15-22. [in Ukrainian]
9. Kuzin O.A., Kurylo I.V., Kuzin M.O. The role of structure in the wear processes of babbitt B16// Metal science and metal processing. - 2007. - No. 4. - p. 14-18. [in Ukrainian]