

УДК 620.178:620.22-419.8

В.О. Скачков, доцент, к.т.н.

С.А. Воденніков, зав. кафедрою, д.т.н., професор

С.С. Сергієнко, аспірант

В.І. Іванов, ст. наук. співробітник

О.С. Воденнікова, асистент

ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ВУГЛЕЦЬ-АЛЮМІНІЄВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА УМОВ ТЕРТЯ

Запорізька державна інженерна академія

Решена задача распределения смазывающего компонента по толщине анти-фрикционного элемента, изготовленного с использованием углерод-алюминиевых композиционных материалов. Получены соотношения для оценки длительности работоспособности узлов трения. Предложена методика расчетного определения коэффициентов трения многокомпонентных углерод-алюминиевых композиционных материалов.

Розв'язано задачу розподілу змащуючого компонента за товщиною антифрикційного елемента, виготовленого з використанням вуглець-алюмінієвих композиційних матеріалів. Одержано співвідношення для оцінки тривалості працездатності вузлів тертя. Запропоновано методику розрахункового визначення коефіцієнтів тертя багатоконпонентних вуглець-алюмінієвих композиційних матеріалів.

Вступ. Металовуглецеві композиційні матеріали мають ряд характеристик, зокрема, високу теплопровідність, міцність та зносостійкість і низьку щільність, які обумовлюють можливість застосування таких матеріалів як функціональних елементів вузлів тертя високоенергетичних пристроїв [1].

Одержання одного з видів вищезгаданих композиційних матеріалів: вуглець-алюмінієвих композитів, – можливо шляхом гарячого пресування вуглецевих волокон, на поверхню яких нанесено гальванічне нікелеве покриття, що характеризується найбільшою однорідністю та достатньою проникністю, спільно з алюмінієвим порошком ПА-0 і алюмінієвою пудрою ПАП [2]. Характеристику матричних компонентів зазначених композитів подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний (%) і гранулометричний склад (мкм) матричних вуглець-алюмінієвих композитів

| Найменування | Al | Fe | Si | Cu | Mn | Волога | Гранулометричний склад |
|--------------|-------|------|------|------|------|--------|------------------------|
| ПА-0 | 98,88 | 0,50 | 0,40 | 0,02 | - | 0,20 | 200...250 |
| ПАП | 98,99 | 0,35 | 0,40 | 0,05 | 0,01 | 0,20 | 1,0... 30,0 |

Відомо, що вуглець-алюмінієві композиційні матеріали, що одержано методом гарячого пресування, характеризуються пористою структурою, яка, в основному, має транспортний характер. Виконуючи заповнення пористої структури таких матеріалів змащуючим компонентом, мають композиційний матеріал з антифрикційними характеристиками.

Під час роботи композиційних матеріалів даного типу в зоні тертя спостерігається винесення компонента, що відповідає за змащування. Зазначене зниження концентрації змащуючого компонента призводить до появи градієнта його концентрації та створення умов дифузії даного компонента з об'єму даного композиційного матеріалу.

Постановка завдання. Завданням роботи є розробка модельної структури процесу дифузії змащуючого компонента в зону тертя й одержання скінченних співвідношень, що визначають працездатність вузлів тертя, виконаних з вуглець-алюмінієвих композиційних матеріалів, а також побудову методики розрахунку коефіцієнтів тертя даних композиційних матеріалів.

Основна частина досліджень.

Дифузійне перенесення змащуючого компонента. Для оцінки розподілу змащуючого компонента за товщиною робочого елемента вузла тертя розглядають задачу його дифузії. Рівняння, що описує перенесення змащуючого компонента до зони тертя шляхом дифузії, має вигляд:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де C – концентрація змащуючого компонента; D – коефіцієнт дифузії; x , τ – координата, яка перпендикулярна до поверхні тертя, та тривалість процесу перенесення відповідно.

Рівняння (1) записане на випадок квазіплоскої поверхні тертя, яка характеризується достатньо великим радіусом кривизни.

Граничні умови для даного рівняння можна представити як

$$D \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = V_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot \tau); \quad (2)$$

$$D \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L} = V, \quad (3)$$

де V_0 – початкова питома швидкість винесення змащуючого компонента у зоні тертя; V – питома швидкість подавання змащуючого компонента на межі антифрикційного шару товщиною L ($x = L$); α – константа, що визначає інтенсивність винесення змащуючого компонента.

Умова (2) задає швидкість винесення змащуючого компонента у зоні тертя за часом, а умова (3) – швидкість подавання змащуючого компонента із зовнішнього середовища до об'єму антифрикційного шару.

Задача (1)-(3) є задачею без початкових умов [3]. Її вирішення має вигляд:

$$C(x, \tau) = Z(x) \cdot \exp(-\alpha \cdot \tau), \quad (4)$$

де $Z(x)$ – функція, що залежить тільки від просторової координати x .

Граничні умови для функції $Z(x)$ з урахуванням умов (2) і (3) можна записати як:

$$D \left. \frac{\partial Z}{\partial x} \right|_{x=0} = V_0; \quad (5)$$

$$D \left. \frac{\partial z}{\partial x} \right|_{x=L} = V, \quad (6)$$

Після підставлення вирішення (4) у рівняння (1) отримують диференціальне рівняння щодо функції $Z(x)$. Вирішення такого рівняння можна представити як

$$Z(x) = C_1 \cdot \sin(K \cdot x) + C_2 \cdot \cos(K \cdot x), \quad (7)$$

де C_1, C_2 – постійні інтегрування; K – уявна частина кореня характеристичного рівняння, $K = (\alpha / D)^{0,5}$.

Постійні C_1 і C_2 знаходять із задоволення граничних умов (5)-(6). Тоді загальне вирішення задачі має вигляд:

$$C(x, \tau) = \left[\frac{V}{D \cdot K} \cdot \sin(K \cdot x) + \frac{V_0 \cdot \cos(K \cdot L) - V}{D \cdot K \cdot \sin(K \cdot L)} \cdot \cos(K \cdot x) \right] \cdot \exp(-\alpha \cdot \tau). \quad (8)$$

Слід зазначити, що працездатний стан вузла тертя буде забезпеченою за умови

$$C(0, \tau) \geq C_{гр.дон}, \quad (9)$$

де $C_{гр.дон}$ – граничнодопустима концентрація змащуючого компонента

Рівняння (8) за умови (9) матиме вигляд:

$$C_{гр.дон} = \left[\frac{V_0 \cdot \cos(K \cdot \ell) - V}{K \cdot \sin(K \cdot \ell)} \right] \cdot \frac{\exp(-\alpha \cdot \tau)}{D}. \quad (10)$$

З вирішення (8) з урахуванням рівняння (10) визначають тривалість працездатного стану вузла тертя τ_p за формулою:

$$\tau_p = \ln \left[\frac{V_0 \cdot \cos(K \cdot L) - V}{C_{кр} \cdot D \cdot K \cdot \sin(K \cdot L)} \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (11)$$

Співвідношення (11) характеризує ресурс роботи вузла тертя за умови поповнення змащуючого компонента у зоні тертя за рахунок дифузії та подавання з навколишнього середовища.

За відсутності поповнення змащуючого компонента на зовнішній стороні робочого елемента пари тертя ($V = 0$) ресурс роботи вузла тертя розраховують як

$$\tau_p = \ln \left[\frac{V_0 \cdot \cos(K \cdot L)}{C_{кр} \cdot D \cdot K \cdot \sin(K \cdot L)} \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (12)$$

Методика визначення коефіцієнтів тертя. Працездатність вузлів тертя визначається величиною зношення фрикційної пари, яка, в свою чергу, залежить як від величини сили тертя, так і фізичних характеристик компонентів композиційного матеріалу. Відомо, що всі компоненти вуглець-алюмінієвого композиційного матеріалу беруть участь у процесі формування сили тертя на поверхні ковзання. В цьому разі сила тертя має випадковий характер та її можна визначити за формулою:

$$F_{тер} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot F_{mp}^i, \quad (13)$$

де $F_{тер}$, F_{mp}^i – випадкові сили тертя композиційного матеріалу та i -го компонента відповідно; λ_i – випадкова індикаторна функція i -го компонента; N – кількість компонентів.

У формулі (13) випадкову силу F_{mp}^i розраховують з використанням співвідношення

$$F_{тер}^i = k_i \cdot \xi_{11}^i, \quad (14)$$

де k_i – коефіцієнт тертя i -го компонента композиційного матеріалу; ξ_{11}^i – випадкове контактне напруження i -го компонента у зоні тертя.

Виконуючи усереднювання формули (13) та враховуючи співвідношення (14), можна записати:

$$F_{тер} = \sum_{i=1}^N \langle \lambda_i \rangle \cdot \langle k_i \rangle \cdot \langle \xi_{11}^i \rangle, \quad (15)$$

де $\langle \cdot \rangle$ – оператор статистичного усереднювання.

У формулі (15) враховано незалежність коефіцієнта k_i від λ_i та ξ_{11}^i , а також значення ξ_{11}^i від λ_i .

Середнє значення контактного напруження для i -го компонента можна розрахувати з використанням відомої формули [4]:

$$\langle \xi_{11}^i \rangle = \sigma_{11} + \frac{\langle \hat{\lambda}_i \cdot \hat{\xi}_{11} \rangle}{\langle \lambda_i \rangle}, \quad (16)$$

де σ_{11} – середнє контактне напруження композиційного матеріалу в зоні тертя; $\hat{\lambda}_i$, $\hat{\xi}_{11}$ – пульсації індикаторної функції та мікроструктурного напруження відповідно.

Тоді силу тертя у зоні ковзання (15) з урахуванням співвідношення (16) визначають як

$$\langle F_{тер} \rangle = \sum_{i=1}^N \langle \lambda_i \rangle \cdot \langle k_i \rangle \cdot \left[1 + \frac{\langle \hat{\lambda}_i \cdot \hat{\xi}_{11} \rangle}{\langle \lambda_i \rangle \sigma_{11}} \right] \cdot \sigma_{11}. \quad (17)$$

З урахуванням співвідношення (17) коефіцієнт тертя композиційного матеріалу можна визначити як

$$k_{тер} = \sum_{i=1}^N \langle \lambda_i \rangle \cdot \langle k_i \rangle \cdot \left[1 + \frac{\langle \hat{\lambda}_i \cdot \hat{\xi}_{11} \rangle}{\langle \lambda_i \rangle \sigma_{11}} \right]. \quad (18)$$

Розрахункові значення коефіцієнтів тертя для вуглець-алюмінієвих композиційних матеріалів різного складу подано у табл. 1. У даній таблиці також наведено значення коефіцієнтів тертя, що одержано експериментальним шляхом у роботі [5].

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів тертя вуглець-алюмінієвих композитів за різним вмістом вуглецевих волокон

| Вміст вуглецевого волокна, % | Коефіцієнт тертя, $k_{тер}$: | |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------|
| | експериментальний | розрахунковий |
| 10 | 0,82 | 0,73 |
| 15 | 0,71 | 0,64 |

| | | |
|----|------|------|
| 30 | 0,49 | 0,49 |
| 40 | 0,39 | 0,41 |
| 60 | 0,15 | 0,21 |

Як видно з даних табл. 1, вміст вуглецевих волокон суттєво впливає на значення коефіцієнтів тертя вуглець-алюмінієвих композиційних матеріалів. Встановлено, що коли вміст вуглецевих волокон дорівнює 10 і 15 % величина коефіцієнта тертя має максимальне значення: відповідно - 0,82 і 0,71. Під час подальшого підвищення вмісту вуглецевих волокон у композиційному матеріалі до 30 і 40 % спостерігають пониження величини коефіцієнта тертя до 0,48 і 0,39 відповідно, а за вмістом вуглецевих волокон, що дорівнює 60 %, зафіксовано подальше зменшення величини даного коефіцієнта до 0,15. Отже, змінювання значень коефіцієнтів тертя в широких межах свідчить про можливість застосування даних композиційних матеріалів як фрикційних, так і антифрикційних елементів вузлів тертя.

Висновки.

1. Виведено співвідношення, що визначають розподіл змащуючого компонента за товщиною антифрикційного шару, виконаного з вуглець-алюмінієвих композиційних матеріалів, а також співвідношення, що встановлюють тривалість стану працездатності вузла тертя.

2. Запропоновано методику визначення коефіцієнтів тертя для багатокомпонентних вуглець-алюмінієвих композиційних матеріалів.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологічні аспекти виготовлення алюмінієвих композиційних матеріалів для деталей двигунів [Текст] / *О. М. Шалай*, В. М. Платонов, Ш. Л. Оборский, В. О. Шалай // Вісті академії інженерних наук України. – 2006. – № 1 (28). – С. 59-64.
2. Особенности получения триботехнических углерод-алюминиевых композитов методами порошковой металлургии [Текст] / *В. А. Скачков*, С. А. Воденников, С. С. Сергиенко и др. // Проблеми трибології. – 2010. – № 4. – С. 91-94.
3. *Тихонов, А. Н.* Уравнения математической физики [Текст] / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 736 с.
4. *Волков, С. Д.* Статистическая механика композитных материалов [Текст] / С. Д. Волков, В. П. Ставров. – Минск : БГУ, 1978. – 206 с. – Библиогр. : с. 197-205.
5. Деякі аспекти одержання вуглець-алюмінієвих композиційних матеріалів триботехнічного призначення [Текст] / *В. О. Скачков*, С.А. Воденніков, В. І. Іванов та ін. // Металургія : наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2011. – Вип. 25. – С. 116-120.

Стаття надійшла до редакції 14.11.2011 р.
Рецензент, проф. Г.О. Колобов