

В. Скачков

Доцент, канд. техн. наук

С. Воденніков

Професор, докт. техн. наук

В. Іванов

Інженер

О. Воденнікова

Магістр

Запорізька державна
інженерна академія,
м. Запоріжжя

УДК 620.178:620.22-419.8

ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛОВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИТІВ АДАПТАЦІЙНОГО ТИПУ

Розроблено структуру вуглець-алюмінієвих композитів і метод прогнозування коефіцієнтів тертя й оцінювання працездатності вузлів тертя на основі зазначених матеріалів.

металовуглецевий композит, вузол тертя, триботехнічна характеристика

Вступ. Вуглець-алюмінієві композити (ВАМ) мають значну теплопровідність, низьку щільність, високу міцність і зносостійкість. Такий перелік характеристик обумовлює застосування зазначених композитів як функціональних елементів вузлів тертя високоенергетичних пристроїв [1].

Одержання таких матеріалів можливе як методом рідкофазового поєднання алюмінієвої матриці та волокнистого вуглецевого наповнювача, так і шляхом гарячого пресування вуглецевих волокон разом з алюмінієвим порошком [2].

Під час рідкофазового поєднання розплавлюючи алюмінію та вуглецевих волокон відбувається хімічна взаємодія, що за температури вище 600 °С призводить до створення карбиду алюмінію, який знижує механічні характеристики вуглецевих волокон і міцність адгезійних зв'язків на межі волокно-матриця [3, 4].

Твердофазове формування вуглець-алюмінієвих композитів методом гарячого пресування ставить вимоги забезпечення достатнього адгезійного зв'язку на межі вуглець-алюміній. Тому на поверхню вуглецевого матеріалу наносять покриття на основі міді, нікелю та хрому [5 - 7]. Одержаний композит є багатокомпонентним, триботехнічні характеристики якого визначаються всіма

його компонентами. Основною особливістю зазначених матеріалів є наявність достатньої структурної неоднорідності. При заповненні пористої структури твердою або рідкою фазою з'являється можливість регулювання величини коефіцієнтів тертя та зносу вуглець-алюмінієвих композитів.

Постановка задачі. Метою роботи є розроблення структури ВАМ, а також методу прогнозування коефіцієнтів тертя й оцінки працездатності вузлів тертя на основі зазначених матеріалів.

Головна частина досліджень. Для нанесення адгезійних покриттів на поверхню вуглецевих волокон типу ВКН-5000 у вигляді джгута, що складається з комплексу елементарних волокон, використовували метод електролітичного осадження солей металів із водних розчинів. Створення таких покриттів здійснювали за температури 20...30 °С з використанням установки, описаної у роботі [8]. Електроліти, що вживали для міднення (I), хромування (II) та нікелювання (III) вуглецевих волокон, мали такий хімічний склад, г/л: (I) 200 $CuSO_4 \cdot 5 H_2O$, 60 H_2SO_4 і 50 HCl ; (II) 400 CrO_3 , 12 $KF \cdot 2H_2O$, 70 $NiSO_4$; (III) 45 $MgSO_4$ і 5 KCl відповідно.

Згідно з результатами експериментів, найповніше вимогам щодо захисту вуглецевих волокон задовольняють

нікелеві покриття, що одержано за значенням щільності катодного струму 0,25 А/дм², напруги електролізу 10 В та тривалості процесу 120 с.

Оцінку впливу захисних покриттів виконували шляхом дослідження розривного навантаження вуглецевих волокон з покриттям і без нього. Розривне навантаження вуглецевих волокон визначали на машині МР-30 за їх базової довжини 130 мм і швидкості навантаження 30 мм/хв.

Встановлено, що оцінка математичного очікування розподілу розривного навантаження для волокон без покриття складає 35,3 Н, волокон з покриттям – 44,7 Н, а величина дисперсії розподілу становить відповідно 35,3 і 16,6. Наявність нікелевого покриття на поверхні вуглецевих колонок забезпечує підвищення середнього значення розривного навантаження волокон практично в два рази.

Під час гарячого пресування вуглець-алюмінієвих композитів на основі алюмінієвого порошку ПА-0 та алюмінієвої пудри ПАП використовували вуглецеве волокно з нікелевим покриттям, яке має найбільшу однорідність та хорошу проникність. Характеристики матричних компонентів зазначених композитів наведено в табл. 1.

Пресування вуглець-алюмінієвих композитів здійснювали за класичною технологією порошкової металургії (у закритій прес-формі за температури 450 °С і питомого тиску 60 МПа). Результати досліджень впливу складу цього композиту на його властивості подано у табл. 2.

Щільність пресованих вуглець-алюмінієвих композитів визначали методом гідростатичного зважування за стандартною технологією, а твердість (за Бринелем) - на твердомірі типу ГШ-2М з використанням сталєвої кульки діаметром 6 мм за величини навантаження 1840 Н та тривалості її застосування 30 с.

Встановлено, що на твердість пресованих ВАМ суттєво впливає вміст вуглецевих волокон. Так, зі збільшен-

ням вмісту вуглецевих волокон до 40...50 % твердість зазначених композитів знижується на 60 %. Під час подальшого збільшення вмісту вуглецевих волокон до 60 % зафіксовано зростання твердості композитів на 16 % відносно її максимального значення.

У формуванні сили тертя на поверхні ковзання беруть участь усі компоненти ВАМ. У цьому разі сила тертя матиме випадковий характер та її можна розрахувати за формулою

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

де $F_{тер}$, $F_{тер}^i$ – випадкові сили тертя композиту та i -тої компоненти відповідно; λ_i – випадкова індикаторна функція i -тої компоненти [9]; N – кількість компонент.

Випадкову силу $F_{тер}^i$ визначають так:

$$F_{тер}^i = k_i \cdot \xi_{11}^i, \quad (2)$$

де k_i – коефіцієнт тертя i -тої компоненти; ξ_{11}^i – випадкове контактне напруження i -тої компоненти в зоні тертя.

Усреднюючи співвідношення (1) з урахуванням рівняння (2), маємо

$$F_{тер} = \sum_{i=1}^N \langle \lambda_i \rangle \cdot \langle k_i \rangle \cdot \langle \xi_{11}^i \rangle, \quad (3)$$

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

Середнє значення контактного напруження для i -тої компоненти можна обчислити з використанням відомої формули [9]

$$\langle \xi_{11}^i \rangle = \sigma_{11} + \frac{\langle \lambda_i \cdot \xi_{11}^i \rangle}{\langle \lambda_i \rangle}, \quad (4)$$

де σ_{11} – середнє контактне напруження ВАМ у зоні тертя; λ_i , ξ_{11}^i – пульсації індикаторної функції та мікроструктурного напруження відповідно.

Враховуючи співвідношення (4), силу тертя в зоні ковзання (3) можна розрахувати як

$$\langle F_{тер} \rangle = \sum_{i=1}^N \langle \lambda_i \rangle \cdot \langle k_i \rangle \cdot \left[1 + \frac{\langle \lambda_i \cdot \xi_{11}^i \rangle}{\langle \lambda_i \rangle \cdot \sigma_{11}} \right] \cdot \sigma_{11}. \quad (5)$$

Коефіцієнти тертя визначали на машині тертя СМТ-1 з використанням системи диск-колодка при питомому тиску 1,6 Па і швидкості відносного ковзання 3,0 м/с. Диск діаметром 60 мм виготовляли з сірого чавуну, зразок вуглець-алюмінієвого композиту – у вигляді колодки розмірами 16x11x10 мм. Сторону зразка з розмірами 16x10 мм задалегідь притирали щодо робочої поверхні диска.

Температура у процесі дослідження складала 100 ± 10 °С.

Експериментальні та розрахункові значення коефіцієнта тертя наведено у табл. 2. Як впливає з аналізу даних табл. 2, значення коефіцієнтів тертя вуглець-алюмінієвих композитів змінюються у широких межах. Залежно від вмісту вуглецевих волокон такі композити

Таблиця 1

Хімічний склад матричних матеріалів ВАМ, %

Найменування	Al	Fe	Si	Cu	Mn	Волога
ПА-О	98,88	0,50	0,40	0,02	-	0,20
ПАП	98,99	0,35	0,40	0,05	0,01	0,20

Таблиця 2

Вплив складу ВАМ на їх властивості

Склад композитів, %			ρ , г/см ³	НВ, Н/мм ²	Коефіцієнт тертя, $k_{тер}$ дослід / розрахунок
I	II	III			
10	45	45	2,18	570	0,82 / 0,73
15	42	43	2,10	500	0,71 / 0,64
30	40	30	2,07	310	0,49 / 0,49
40	40	20	2,06	240	0,39 / 0,41
60	28	12	1,46	270	0,15 / 0,21

можна застосовувати як фрикційні, так і антифрикційні матеріали.

Для ВАР, одержаних методом гарячого пресування, характерною є пориста структура, яка, в основному, має транспортний характер. Заповнюючи пористу структуру змащувальним компонентом, одержують композиційний матеріал з антифрикційними характеристиками.

Під час роботи такого композиту в зоні тертя реалізуються процеси винесення змащувальної компоненти. Як наслідок, знижуються її концентрація в зоні тертя та з'являється градієнт концентрації щодо напрямку, перпендикулярного до поверхні тертя.

Для оцінення розподілу змащувальної компоненти відносно товщини робочого елемента пари тертя розглядають задачу його дифузії, яка подається наступними співвідношеннями:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}; \quad (6)$$

$$D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = V_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot \tau); \quad (7)$$

$$D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=1} = V, \quad (8)$$

де C – концентрація змащувальної компоненти; D – коефіцієнт дифузії; x, τ – координата, перпендикулярна до поверхні тертя, та тривалість процесу відповідно; V_0 – початкова питома швидкість винесення змащувальної компоненти в зоні тертя; α – константа, пов'язана з інтенсивністю зносу; 1 – товщина робочого елемента пари тертя; V – питома швидкість подачі змащувальної компоненти на зовнішній поверхні.

Задачу (6) – (8) класифікують як задачу без початкових умов. У цьому разі її розв'язок можна записати так:

$$C(x, \tau) = R(x) \cdot \exp(-\alpha \cdot \tau), \quad (9)$$

де $R(x)$ – функція, залежна тільки від координати x .

Граничні умови для $R(x)$ матимуть вигляд:

$$D \frac{\partial R}{\partial x} \Big|_{x=0} = V_0; \quad (10)$$

$$D \frac{\partial R}{\partial x} \Big|_{x=1} = V. \quad (11)$$

Після підставлення співвідношення (10) до рівняння (7) одержують лінійне рівняння другого порядку для функції $R(x)$. Розв'язок одержаного рівняння містить дві сталі інтегрування, значення яких знаходять з граничних умов (10) – (11). Тоді загальний розв'язок буде записано так:

$$C(x, \tau) = \left[V_0 \cdot \sin(K \cdot x) + \frac{V_0 \cdot \cos(K \cdot 1) - V}{K \cdot \sin(K \cdot 1)} \cdot \cos(K \cdot x) \right] \cdot \frac{\exp(-\alpha \cdot \tau)}{D}, \quad (12)$$

де K – уявна частина кореня характеристичного рівняння, $K = (\alpha/D)^{0.5}$.

Для визначення величини константи α встановлюють експериментальне значення інтенсивності винесення маси змащувальної компоненти в зоні тертя. Тоді значення α можна обчислити з використанням формули

$$\alpha = -\frac{1}{\tau} \cdot \ln \left[\frac{I(\tau)}{V_0} \right], \quad (13)$$

де I – інтенсивність винесення маси змащувальної компоненти в зоні тертя на момент часу τ .

Формула (12) описує розподіл концентрації змащувальної компоненти щодо товщини робочого елемента пари тертя. Працездатність пари тертя буде забезпечена доти, доки виконується умова

$$C(0, \tau) \geq C_{кр}, \quad (14)$$

де $C_{кр}$ – гранично припустима концентрація змащувальної компоненти.

Рівняння (12) за умови (14) буде записано так:

$$C(x, \tau) = \left[\frac{V_0 \cdot \cos(K \cdot 1) - V}{K \cdot \sin(K \cdot 1)} \right] \cdot \frac{\exp(-\alpha \cdot \tau)}{D}. \quad (15)$$

З наведеного рівняння нескладно визначити тривалість працездатності пари тертя τ_p :

$$\tau_p = -\frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left[\frac{C_{кр} \cdot D \cdot K \cdot \sin(K \cdot 1)}{V_0 \cdot \cos(K \cdot 1) - V} \right]. \quad (16)$$

У разі відсутності поповнення змащувальної компоненти на зовнішній стороні робочого елемента пари тертя ($V = 0$) тривалість її працездатності

$$\tau_p = -\frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left[\frac{C_{кр} \cdot D \cdot K}{V_0} \cdot \operatorname{tg}(K \cdot 1) \right]. \quad (17)$$

Розв'язок (12) характеризує процес дифузії змащувальної компоненти в зону тертя. Такий процес підтримує працездатність пари тертя за сталих умов, тобто зі сталою силою тертя (сталим коефіцієнтом тертя).

Висновки. Визначено раціональні режими модифікації поверхні вуглецевих волокон електролітичним нікелем, одержано зразки вуглець-алюмінієвих композитів з вмістом вуглецевих волокон від 10 до 60 %. Встановлено межі зміни твердості від 230 до 570 Н/мм² і коефіцієнтів тертя від 0,15 до 0,82. Виведено кінцеві співвідношення, які встановлюють тривалість працездатності пари тертя для композитів адаптаційного типу.

Література

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. *Структура* и свойства композиционных материалов [сб. научн. трудов / научн. ред. В. С. Портной]. – М.: Машиностроение, 1979. – 253 с.

3. *Kotval P. S.* Wear resistant aluminum – a new approach: cast surface composites [Text] / P. S. Kotval // *Journal of Metals*. – 1974. – V. 26. – № 1. – P. 13-17.

4. *Pepper R. T.* The tensile properties of graphite-fiber reinforced Al-Si alloy [Text] / R. T. Pepper, J. W. Upp // *Met. Trans.* – 1971. – V. 2. – № 1. – P. 117-120.

5. *Салибеков С. Е.* Исследование влияния никелевых покрытий на волокне на структуру и свойства композиционного материала алюминий-углеродное волокно [Текст] / С. Е. Салибеков, А. А. Заболоцкий // Волокнистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы. – М.: Наука, 1976. – С. 33-37.

6. *Ягубец А. Н.* Нанесение никелевых покрытий на углеродные волокна химическим и электрохимическим методами [Текст] / А. Н. Ягубец, Ж. И. Бобанов // Композиционные металлические материалы. – М.: ОНТИ, 1972. – С. 190-198.

7. *Алюминиевые* композиты триботехнического назначения, полученные методом вакуумно-компрессионной пропитки [Текст] / [Л. Р. Вишняков, В. Л. Коханий, В. П. Мороз, Е. И. Кладницкий] // Композиционные материалы в промышленности: материалы 23-й междунар. конф. – Ялта, 2003. – С. 161-162.

8. *Особенности* получения триботехнических углерод-алюминиевых композитов методами порошковой металлургии / В. А. Скачков, С. А. Воденников, С. С. Сергиенко [и др.] // Проблемы трибологии. – 2010. – № 4. – С. 91-94.

9. *Волков С. Д.* Статистическая механика композитных материалов [Текст] / С. Д. Волков, В. П. Ставров. – Минск: БГУ, 1978. – 206 с.

Отримана 07.11.11

V. Skachkov, S. Vodennikov, V. Ivanov, O. Vodennikova
Tribological Characteristics of adaptive type metal-carbon composites

Zaporizhzhia State Engineering Academy, Zaporizhzhia

The structure of carbon-aluminum composites and method of predicting friction coefficients and evaluation of performance friction units based on these materials are developed.

Інформація

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ, ВИГОТОВЛЕННЯ І ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

3-я Міжнародна науково-технічна конференція
Україна, м. Львів, 7 – 9 листопада 2012 р.

Мінісимпозіуми:

«Вплив корозійних та водневмісних середовищ на міцність і руйнування матеріалів та конструкцій»

«Діагностика матеріалів, конструкцій і машин»

Тематика конференції:

Проблеми якості та конкурентоспроможності продукції машинобудування.
Автоматизація проектування, підготовки і управління виробництвом.
Моделювання, синтез і оптимізація машинобудівних конструкцій.
Динаміка та міцність машин.
Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій.
Матеріалознавство та інженерія поверхні
Новітні технології у машинобудуванні.
Зварювання та споріднені процеси і технології.
Застосування вібрацій у техніці і технологіях.

Методи і засоби діагностування матеріалів та конструкцій.
Діагностика і прогнозування залишкового ресурсу конструкцій та споруд тривалої експлуатації.
Проектування, виготовлення, експлуатація і сервіс транспортних засобів.

Адреса для кореспондування:

А/с 6758, м. Львів, 79058, Україна,
e-mail: me@in.lviv.ua; zncnan@mail.lviv.ua
Тел.: (032) 261-07-19; (032) 258-21-71;
+38 0679998734; +38 0974409900
<http://www.znc.com.ua/>