

В.О. Скачков⁽¹⁾, доцент, к.т.н.
Г.А. Баглюк⁽²⁾, заст. директора, д.т.н., професор
О.С. Воденнікова⁽¹⁾, асистент
В.І. Іванов⁽¹⁾, ст. наук. співробітник

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА КОМПЛЕКСУ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ КОМПОЗИТІВ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ТИПУ

⁽¹⁾ Запорізька державна інженерна академія,

⁽²⁾ Інститут проблем матеріалознавства НАНУ, м. Київ

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований теплоемкости, а также коэффициентов теплопроводности и линейного теплового расширения многокомпонентных композитов триботехнического типа. Сопоставление вычисленных и практических значений указанных характеристик свидетельствует об их достаточной сходимости.

Подано результати розрахунково-експериментальних досліджень теплоємності, а також коефіцієнтів теплопровідності та лінійного теплового розширення багатоконпонентних композитів триботехнічного типу. Зіставлення обчислених і практичних значень зазначених характеристик свідчить про їх достатню збіжність.

Вступ. Успіхи сучасного розвитку матеріалознавства пов'язані з можливістю моделювання умов експлуатації багатоконпонентних композитів, яких розробляють, та можливостями цілеспрямованого комп'ютерного конструювання фрикційних пар вузлів тертя на їх основі [1]. Різноманіття матричних матеріалів і схем армування дозволяє направлено регулювати різні службові властивості таких композитів шляхом підбирання складу, а також змінювання співвідношення компонентів і мікроструктури матеріалу. Тому найважливішою перевагою зазначених матеріалів слугує можливість створення на їх основі елементів конструкцій із заздалегідь заданими службовими характеристиками [2,3]. Особливо ефективним є застосування багатоконпонентних композитів у вузлах тертя, де інші антифрикційні матеріали, що потребують змащування, мають низьку працездатність через високі або низькі температури їх експлуатації, а також агресивність робочого середовища [4].

Під час оцінки умов застосування таких композитів у вузлах тертя необхідно враховувати їх теплофізичні характеристики – теплоємність і коефіцієнт теплопровідності, які забезпечують поглинення та відведення теплової енергії, що утворюється в зоні тертя, а також коефіцієнт лінійного теплового розширення.

Постановка задачі. Завданням роботи є розробка моделей для визначення зазначених теплофізичних характеристик багатоконпонентних композитів триботехнічного типу, а також оцінка їх адекватності на основі результатів порівняльних експериментів.

Основна частина досліджень. Формування структури багатоконпонентних композитів триботехнічного типу багато в чому залежить від форми, гранулометричного складу, об'ємного вмісту та якісних характеристик початкових компонентів суміші. Як компоненти композитів використовували графіт, глинозем, карбід титану, а також порошок алюмінію. Для підвищення адгезії між компонентами під час форму-

вання щільнішої структури композиту на поверхню графіту, глинозему та карбиду титану заздалегідь наносили гальванічне нікелеве покриття.

Зразки композитів на основі зазначених компонентів одержували методом прямого двостороннього гарячого пресування за питомим тиском 60 МПа та температури 723 К. Склад одержаних зразків композитів наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Склад композитів триботехнічного типу

Компоненти композитів	Вміст компонентів, %, за серіями зразків				
	I	II	III	IV	V
графіт	11,5	20,2	25,6	34,4	44,4
порошок алюмінію	26,9	17,6	74,4	23,2	53,3
глинозем	57,1	-	-	21,2	-
карбід титану	-	60,5	-	19,3	-
нікель	4,5	1,7	2,0	1,9	2,3

Експериментальні значення теплоємності зразків зазначених багатокомпонентних композитів визначали методом динамічного колориметра з тепломіром та адіабатичною оболонкою на приладі НТ-с-400.

З достатньою інженерною точністю теплоємність c композитів, що досліджують, можна визначати за формулою:

$$c = \sum_{k=1}^n c_k \cdot P_k, \quad (1)$$

де P_k , c_k – об’ємний вміст і теплоємність k -го компонента, відповідно; N – кількість компонентів у композиті.

Враховуючи залежність теплоємності c від температури, можна записати

$$c(T) = B_0 + B_1 \cdot T + B_2 \cdot T^{-2} + B_3 \cdot T^{-3}, \quad (2)$$

де B_k – коефіцієнти; T – температура.

Коефіцієнти B_k рівняння (2) обчислюють з використанням співвідношення:

$$B_k = \sum_{k=1}^n b_k \cdot P_k, \quad (3)$$

де b_k – емпіричні коефіцієнти, значення яких подано у табл. 2.

Таблиця 2 – Коефіцієнти b_k для моделі теплоємності [5]

Компонент композиту	b_0	$b_1 \cdot 10^3$	$b_2 \cdot 10^5$
вуглець	4,10	1,02	-2,10
алюміній	4,94	2,96	0
глинозем	27,43	3,06	-8,47
карбід титану	11,83	0,80	-3,58
нікель	4,06	7,04	0

У табл. 3 наведено експериментальні та розрахункові значення теплоємності композитів, що досліджують. Величина максимального відхилення дослідних і теоретичних значень зазначеної характеристики не перевищує 12 %.

В рамках середовища класу B_2 [6] коефіцієнт теплопровідності λ_{ij} багатокомпонентного композиту можна записати як

$$\lambda_{ij} = \sum_{k=1}^n \lambda_{ij}^k \cdot \phi_k, \quad (4)$$

де λ_{ij}^k – коефіцієнт теплопровідності k -го компонента композиту; ϕ_k – випадкова індикаторна функція k -го компонента [6].

Таблиця 3 – Теплоємність композитів серій I...V

Серія зразків	Теплоємність, Дж/(кг·К), за температури, К									
	293		373		473		573		673	
	розрахунок	дослід	розрахунок	дослід	розрахунок	дослід	розрахунок	дослід	розрахунок	дослід
I	0,780	0,746	0,966	0,922	1,065	1,097	1,131	1,165	1,181	1,169
II	0,673	0,638	0,886	0,849	0,997	0,949	1,068	1,110	1,121	1,101
III	0,827	0,797	0,991	0,965	1,089	1,035	1,162	1,184	1,222	1,250
IV	0,730	0,709	0,986	1,012	1,120	1,094	1,206	1,227	1,270	1,292
V	0,780	0,752	1,020	0,988	1,155	1,126	1,245	1,222	1,315	1,348

Узагальнюючи результати роботи [7] стосовно багатоконпонентних хаотично армованих композитів, розрахункову формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності можна записати

$$\lambda_{ij} = \left(\langle \lambda_{ij} \rangle - \frac{\sum_{k=1}^n \langle \lambda_{ij}^k \rangle^2 \cdot (I_k^2 \cdot P_k^2 + D_k^2)}{3 \langle \lambda_{ij} \rangle} \right) \cdot \delta_{ij}, \quad (5)$$

де I_k – варіація коефіцієнта теплопровідності k -го компонента композиту; $\langle \dots \rangle$ – оператор статистичного усереднювання; D_k^2 – момент другого порядку для ϕ_k , $D_k^2 = P_k \cdot (1 - P_k)$; δ_{ij} – функція Дірака.

У табл. 4 подано коефіцієнти теплопровідності та лінійного теплового розширення компонентів композиту для температури до 673 К.

Таблиця 4 – Коефіцієнти теплопровідності та лінійного теплового розширення (КЛТР) компонентів композиту, Вт/(м·К)

Компоненти композиту	КЛТР компонента, 10^{-6} , 1/К	Температура, К					Джерело
		293	373	473	573	673	
вуглець	4,6	111	104	97	89	81	[8]
глинозем	8,5	32,3	30,0	27,4	24,8	28,2	[9]
карбід титану	7,5	25	27	28	29	30	[9]
алюміній	22,6	235	238	234	230	224	[10]
нікель	13,7	90,4	79,7	72,1	63,3	60,9	[10]

Використовуючи формулу (5) та дані з табл. 4, здійснювали розрахунки значень коефіцієнта теплопровідності в інтервалі температур 293...673 К для серій зразків, поданих у табл. 2. Результати обчислень наведено у табл. 5.

До табл. 5 також внесено експериментальні значення коефіцієнта теплопровідності багатоконпонентних композитів, що одержано з використанням методу динамічного колориметра на приладі НТ- λ -400.

Таблиця 5 – Коефіцієнт теплопровідності композитів серій I...IV

Серія	Коефіцієнт теплопровідності композитів, Вт/(м·К), за температури, К:									
	293		373		473		573		673	
	розрахунок	до-слід	розрахунок	до-слід	розрахунок	до-слід	розрахунок	до-слід	розрахунок	до-слід
I	62,5	65,6	58,0	56,5	54,7	52,4	51,2	49,9	47,4	48,8
II	61,3	59,9	60,1	63,2	58,0	60,3	55,6	58,4	53,0	54,6
III	168,8	173,5	168,5	172,4	164,1	168,0	159,4	162,5	153,6	157,8
IV	77,5	50,5	74,1	76,3	70,0	71,4	65,4	66,8	60,6	61,8
V	134,6	138,4	131,8	136,2	126,7	130,7	121,0	123,8	114,7	117,0

З аналізу одержаних результатів виходить, що з підвищенням температури спостерігається зниження значень коефіцієнта теплопровідності зразків усіх серій у середньому на 17 %. При цьому його максимальне зниження зафіксовано для зразка серії I (24 %), що можна пояснити значним вмістом у його складі глинозему. Окрім того, встановлено, що розрахункові значення даного коефіцієнта з точністю не нижче ніж 12 % узгоджуються з величинами, одержаними в експерименті [11].

Випадкові модулі пружності θ_{ijmn} та коефіцієнти лінійного теплового розширення α_{ij} , що задано на елементах другого порядку мализни для композитів у вигляді середовища класу B_2 , можна подати як

$$\theta_{ijmn} = \sum_{k=1}^n \theta_{ijmn}^k \cdot \phi_k ; \quad (6)$$

$$\alpha_{ij} = \sum_{k=1}^n \alpha_{ij}^k \cdot \phi_k , \quad (7)$$

де θ_{ijmn}^k , α_{ij}^k – модуль пружності та коефіцієнт лінійного теплового розширення k -го компонента середовища, відповідно.

Фізичне рівняння для статистичного завдання термopужності у рамках середовища класу B_2 з урахуванням формул (6) і (7) має вигляд

$$\xi_{ij} = \sum_{k=1}^n \theta_{ij\alpha\beta}^k \cdot \phi_k \cdot \left(\varepsilon_{\alpha\beta} - \sum_{p=1}^n \alpha_{\alpha\beta}^p \cdot \phi_p \cdot T \right) , \quad (8)$$

де ε_{mn} – випадкові мікроструктурні деформації.

Після усереднювання рівняння (8) з урахуванням статистичної незалежності θ_{ijmn}^k і α_{ij}^k одержують

$$\langle \xi_{ij} \rangle = \sum_{k=1}^n \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \cdot \left(\langle \phi_k \rangle \langle \varepsilon_{\alpha\beta} \rangle + \langle \hat{\phi}_k \cdot \hat{\varepsilon}_{\alpha\beta} \rangle \right) - \sum_{k=1}^n \left(\sum_{p=1}^n \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \langle \alpha_{\alpha\beta}^p \rangle \langle \phi_k \rangle \langle \phi_p \rangle + \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \langle \alpha_{\alpha\beta}^k \rangle \langle \hat{\phi}_k^2 \rangle \right) \cdot T , \quad (9)$$

де $\hat{\phi}$, $\hat{\varepsilon}$ – варіації випадкових функцій.

Враховуючи, що макроскопічні напруження дорівнюють $\sigma_{ij} = \langle \xi_{ij} \rangle$, а перший доданок рівняння (9) – величині $C_{ij\alpha\beta}^0 \cdot \alpha_{\alpha\beta}^0$, можна записати

$$C_{ij\alpha\beta}^0 \cdot \alpha_{\alpha\beta}^0 = \Pi_{ij} , \quad (10)$$

де $\Pi_{ij} = \sum_{k=1}^n \left(\sum_{p=1}^n \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \langle \alpha_{\alpha\beta}^p \rangle \langle \phi_k \rangle \langle \phi_p \rangle + \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \langle \alpha_{\alpha\beta}^k \rangle \langle (\bar{\phi}_k)^2 \rangle \right)$; $C_{ij\alpha\beta}^0$, $\alpha_{\alpha\beta}^0$ – макроскопічні значення модулів пружності та коефіцієнта лінійного теплового розширення, відповідно.

Для хаотично армованих композитів, які мають ізотропні фізико-механічні характеристики, макроскопічні коефіцієнти лінійного теплового розширення визначають із системи рівнянь (10) з використанням співвідношень:

$$\alpha_{ij}^0 = S_{ij\alpha\beta} \cdot \Pi_{\alpha\beta}, \quad (11)$$

де S_{ijmn} – обернена матриця для $C_{ij\alpha\beta}^0$.

Компоненти матриці S_{ijmn} для ізотропних багатокомпонентних композитів мають вигляд:

$$S_{iiii} = \frac{\left[(C_{1111}^0)^2 - (C_{1122}^0)^2 \right]}{D};$$

$$S_{ijij} = \frac{\left[(C_{1122}^0)^2 - C_{1111}^0 \cdot C_{1122}^0 \right]}{D}; \quad (12)$$

$$D = (C_{1111}^0)^3 + 2(C_{1122}^0)^3 - 3C_{1111}^0 \cdot (C_{1122}^0)^2,$$

де C_{1111}^0 , C_{1122}^0 – макроскопічні модулі пружності.

Результати обчислень коефіцієнтів лінійного теплового розширення для серій композитів, що досліджують, подано у табл. 6.

Таблиця 6 – Значення коефіцієнтів лінійного теплового розширення α_{ij} зразків композитів серій I...IV

Коефіцієнт лінійного теплового розширення багатокомпонентних композиту, 1/К, 10^{-6}	Серії зразків				
	I	II	III	IV	V
	15,81	12,18	24,12	5,82	11,79
	14,97	11,26	22,91	5,71	10,92

Примітка: у чисельнику – розрахункові значення характеристики;
у знаменнику – експериментальні результати

Як показують результати розрахунків коефіцієнта лінійного теплового розширення багатокомпонентних композитів, його значення для всіх серій зразків змінюються у широкому діапазоні: від $5,82 \cdot 10^{-6}$ до $24,12 \cdot 10^{-6}$ 1/К. Встановлено зростання коефіцієнта лінійного теплового розширення композитів із збільшенням вмісту алюмінієвого порошку, що можна пояснити значним індивідуальним значенням даного коефіцієнта для зазначеного компонента. Ще значніше впливає підвищення вмісту глинозему: так, під час збільшення його вмісту від 21,2 до 57,1 % значення коефіцієнта α_{ij} , зростає майже у 2,7 разів. Зіставлення результатів обчислення та експерименту щодо визначення зазначеного коефіцієнта вказує на їх достатню збіжність [12].

Висновки.

1. Запропоновано розрахункові методики обчислення теплофізичних характеристик: теплоємності, а також коефіцієнтів теплопровідності та лінійного теплового розширення, – багатокомпонентних композитів триботехнічного типу.

2. Встановлено залежність теплофізичних характеристик зазначених компози-

тів від температури. Виконано оцінку точності запропонованих розрахункових методик визначення теплофізичних характеристик для п'ятих типів композитів шляхом порівняння результатів обчислення та значень експериментів. Одержані результати узгоджуються, ступінь їх відхилення не перевищує 12 %, що свідчить про адекватність розроблених моделей реальному процесу.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дедков, Г. В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели [Текст] / Г. В. Дедков // Успехи физических наук. – 2000. – № 6. – С. 586-618.
2. Адашкин, А. М. Материаловедение и технология материалов [Текст] / А. М. Адашкин, В. М. Зуев. – М. : Форум, 2010. – 336 с. – Библиогр. : с. 332-335. – ISBN 978-5-9113-4341-5.
3. Костиков, В. И. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы [Текст] / В. И. Костиков, А. Н. Варенков. – М. : Интернет Инжиниринг, 2003. – 560 с. – Библиогр. : с. 554-559. – ISBN 978-5-9174-5242-3.
4. Бушуев, Ю. Г. Углерод-углеродные композиционные материалы [Текст] : справочник / Ю. Г. Бушуев, М. И. Персин, В. А. Соколов. – М. : Metallurgia, 1994. – 128 с. – Библиогр. : с. 124-127. – ISBN 5-229-01167-X.
5. Уикс, К. Е. Термодинамические свойства 65 элементов, их оксидов, галогенидов, карбидов и нитридов [Текст] : пер. с англ. ; справочник / К. Е. Уикс, Ф. Е. Блок. – М. : Metallurgia, 1965. – 240 с. – Библиогр. : с. 237-239.
6. Богачев, И. Н. Введение в статистическое материаловедение [Текст] / И. Н. Богачев, А. А. Вайнштейн, С. Д. Волков. – М. : Metallurgia, 1972. – 216 с. – Библиогр. : с. 211-214.
7. Волков, С. Д. Статистическая механика композитных материалов [Текст] / С. Д. Волков, В. П. Ставров. – Минск : БГУ, 1978. – 206 с. – Библиогр. : с. 197-205.
8. Свойства конструкционных материалов на основе углерода [Текст] : справочник / В. Г. Нагорный, А. С. Котосонов, В. Г. Островский и др. ; под ред. В. П. Соседова. – М. : Metallurgia, 1975. – 336 с. – Библиогр. : с. 332-335.
9. Мармер, Э. Н. Материалы для высокотемпературных вакуумных установок [Текст] / Э. Н. Мармер. – М. : Физматлит, 2007. – 152 с. – Библиогр. : с. 149-151. – ISBN 978-5-9221-0823-5.
10. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах [Текст] : справочное издание / В. Е. Зиновьев. – М. : Metallurgia, 1989. – 382 с. – Библиогр. : с. 360-380. – ISBN 5-229-00260-3.
11. Теплофизические характеристики многокомпонентных композиционных материалов [Текст] / С. А. Воденников, В. А. Скачков, О. С. Воденникова, В. И. Иванов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2012. – № 1. – С. 27-30.
12. Воденникова, О. С. Исследование и прогнозирование теплофизических характеристик многокомпонентных композиционных материалов [Текст] / О. С. Воденникова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 1/5 (55). – С. 11-13.

Стаття надійшла до редакції 18.07.2012 р.
Рецензент, проф. І.Г. Яковлева