

УДК 620.22-419.8:536.21

Д-р техн. наук С. А. Воденников, канд. техн. наук В. А. Скачков,
О. С. Воденникова, В. И. Иванов

Государственная инженерная академия, г. Запорожье

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МЕТАЛЛОУГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Предложены модели прогнозирования коэффициентов теплопроводности и теплоемкости многокомпонентных металлоуглеродных композиционных материалов триботехнического типа. Выполнена экспериментальная проверка предлагаемых моделей.

Ключевые слова: многокомпонентный металлоуглеродный композит, теплоемкость, коэффициент теплопроводности, температура, расчет, эксперимент.

Современное развитие машиностроения Украины требует создания материалов, обладающих механической прочностью при высоких нагрузках, повышенной износостойкостью, термостойкостью, малой плотностью, возможностью регулирования теплопроводности в широких пределах, а также хорошими электрофизическими свойствами [1]. Многообразие матричных материалов и схем армирования позволяет направленно регулировать прочность, жесткость и другие служебные свойства путем подбора состава, изменения соотношения компонентов и макроструктуры композиционного материала. Поэтому важнейшим преимуществом данных материалов является возможность создания из них элементов конструкций с заранее заданными служебными свойствами [2, 3]. Особенно эффективно их применение в узлах трения, где другие антифрикционные материалы, требующие смазки, имеют низкую работоспособность из-за высоких или низких температур, а также агрессивности среды [4].

Для оценки условий применения композиционных материалов в узлах трения учитывают их теплофизические характеристики – теплоемкость и коэффици-

ент теплопроводности, которые обеспечивают поглощение и отвод тепловой энергии, образующейся в зоне трения.

Целью работы является построение моделей прогнозирования теплофизических характеристик композиционных материалов и оценку их адекватности на основе экспериментальных данных.

Формирование структуры многокомпонентных композиционных материалов в процессе прессования во многом зависит от формы, гранулометрического состава, объемного содержания и качественных характеристик исходных компонентов смеси. В качестве компонентов композиционных материалов триботехнического типа использовали графит чешуйчатый, графит искусственный, глинозем, карбид титана, алюминиевый порошок и алюминиевую пудру. С целью повышения адгезии между компонентами и формирования более плотной структуры композиционного материала на основные компоненты (графит чешуйчатый, графит искусственный, глинозем, карбид титана) предварительно наносили гальваническое никелевое покрытие. Характеристики компонентов композиционных материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристика компонентов композиционных материалов

Наименование компонента	Диаметр частиц, мкм		Удельная поверхность, 10^{-4} , мм ² /г	Химический состав, %				
	min	max		C	Al	Al ₂ O ₃	Ni	TiC
Порошок алюминия	45,0	250,0	0,0778	–	99,8	0,2	–	–
Пудра алюминиевая	10,0	40,0	9,2	–	99,4	0,6	–	–
Графит чешуйчатый	70,5	493,5	1,3	97,3	–	–	2,7	–
Графит искусственный	13,5	364,5	4,0	95,3	–	–	4,7	–
Оксид алюминия	27,0	81,0	4,5	–	–	94,6	5,4	–
Карбид титана	15,5	47,0	2,0	–	–	–	0,7	99,3

С достаточной инженерной точностью коэффициенты теплоемкости многокомпонентных композиционных материалов C_k можно рассчитать по формуле:

$$C_k = \sum_{i=1}^N C_i \cdot P_i, \quad (1)$$

где P_i , C_i – объемное содержание и теплоемкость компонента с номером i ; N – число компонентов композита.

Учитывая зависимость коэффициентов теплоемкости от температуры, можно записать:

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

где B_i – коэффициенты; T – температура.

Коэффициенты уравнения (2) определяют с использованием соотношения:

$$B_i = \sum_{i=1}^N b_i \cdot P_i, \quad (3)$$

Методом прямого двухстороннего горячего пресования при удельном давлении 60 МПа и температуре 723 К получены образцы композиционных материалов на основе компонентов, представленных в табл. 1. Состав полученных образцов композитов представлен в табл. 2.

Теплоемкость образцов определяли методом динамического колориметра с тепломером и адиабатической оболочкой на приборе НТ-с-400.

Исходные данные для расчета теплоемкости по формулам (2) и (3) представлены в табл. 3 [5].

В табл. 4 представлены опытные и расчетные значения теплоемкости исследуемых типов многокомпонентных композиционных материалов. Величина максимального отклонения опытных и расчетных значений не превышает 20 %.

Для оценки условий применения триботехнических материалов применяются коэффициенты теплопроводности.

Таблица 2 – Состав композиционных материалов триботехнического назначения

Компоненты композита	Содержание компонентов, %, по сериям образцов			
	I	II	III	IV
Графит чешуйчатый	6,7	8,6	11,5	11,9
Графит искусственный	37,7	13,9	–	9,6
Оксид алюминия	–	–	57,1	–
Карбид титана	–	–	–	66,5
Алюминий	53,3	76,5	26,9	10,5
Никель	2,3	1,0	4,5	1,5

Таблица 3 – Коэффициенты b_i в модели теплоемкости

Компонент	b_0	$b_1 \cdot 10^3$	$b_2 \cdot 10^5$
Углерод	4,10	1,02	-2,10
Алюминий	4,94	2,96	0
Никель	4,06	7,04	0
Оксид алюминия	27,43	3,06	-8,47
Карбид титана	11,83	0,80	-3,58

В рамках среды класса B_2 [6] коэффициенты теплопроводности многокомпонентного композита a_{ij} можно записать:

$$a_{ij} = \sum_{i=1}^N a_{ij}^k \cdot \lambda_k, \quad (4)$$

где a_{ij}^k – коэффициенты теплопроводности k -го компонента композита; λ_k – случайная индикаторная функция компонента [6]; N – число компонентов в композите.

Таблица 4 – Теплоемкость полученных образцов композитных материалов

Серия образцов	Теплоемкость образцов, Дж/(кг·К), при температуре, К									
	293		373		473		573		673	
	расчет	опыт	расчет	опыт	расчет	опыт	расчет	опыт	расчет	опыт
I	0,78	0,59	1,02	0,81	1,15	0,83	1,24	0,98	1,31	-
II	0,83	0,69	0,98	0,89	1,08	0,98	1,16	1,28	1,21	-
III	0,77	0,73	0,96	1,02	1,06	1,04	1,13	1,16	1,18	1,22
IV	0,64	0,60	0,87	0,75	0,99	0,98	1,06	0,97	1,12	1,16

Обобщая результаты работы [7] применительно к многокомпонентным хаотически армированным композиционным материалам, получают расчетную формулу для прогнозирования коэффициентов теплопроводности:

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

где I_k – коэффициент вариации коэффициентов теплопроводности k -го компонента композита; P_k – объемное содержание компонента композита с номером k ; $\langle \dots \rangle$ – оператор статистического осреднения; D_k^2 – момент второго порядка для λ_k ; $\langle a_{ij} \rangle$ – среднее значение, полученное осреднением (4).

Величину D_k^2 вычисляют по формуле:

$$D_k^2 = P_k \cdot (1 - P_k). \quad (6)$$

В табл. 5 представлены коэффициенты теплопроводности компонентов композита для температуры до 673 К.

Используя данные табл. 5 для серий образцов, представленных в табл. 2, по формуле (5) произведены расчеты коэффициентов теплопроводности в интервале температур 293...673 К. Результаты расчетов представлены в табл. 6.

Экспериментальные значения коэффициентов теплопроводности получены методом динамического колориметра по стандартной методике на приборе НТ-1-400 и приведены в табл. 6.

Из анализа данных (табл. 6) следует, что коэффициенты теплопроводности исследуемых серий образцов с повышением температуры снижаются до 15 %. Расчетные значения коэффициентов теплопроводности с точностью не хуже 12 % соответствуют величинам, полученным в эксперименте.

Выводы

Установлена зависимость теплоемкости и коэффициентов теплопроводности металлоуглеродных многокомпонентных композиционных материалов от температуры. Проведена оценка точности предложенных расчетных методик путем сопоставления с экспериментальными значениями теплоемкости и коэффициентов теплопроводности четырех типов композиционных материалов.

Таблица 5 – Коэффициенты теплопроводности компонентов композита, Вт/(м·К)

Компоненты композита	Температура, К					Источник
	293	373	473	573	673	
Углерод	111	104	97	89	81	[8]
Алюминий	235	238	234	230	224	[9]
Никель	90,4	79,7	72,1	63,3	60,9	[9]
Оксид алюминия	32,3	30,0	27,4	24,8	28,2	[10]
Карбид титана	25	27	28	29	30	[10]

Таблица 6 – Коэффициенты теплопроводности, (Вт/(м·К)), композита в интервале температур 293...673 К

Серия образцов	Температура, К				
	293	373	473	573	673
I	$\frac{139,0}{134,6}$	$\frac{125,9}{131,7}$	$\frac{119,5}{126,7}$	$\frac{117,8}{121,0}$	$\frac{120,1}{114,7}$
	$\frac{172,0}{175,3}$	$\frac{183,4}{175,4}$	$\frac{176,4}{171,1}$	$\frac{170,7}{166,5}$	$\frac{155,0}{160,7}$
III	$\frac{68,7}{60,5}$	$\frac{60,2}{58,1}$	$\frac{57,3}{54,7}$	$\frac{55,2}{51,1}$	$\frac{-}{47,4}$
	$\frac{59,3}{50,1}$	$\frac{56,1}{48,8}$	$\frac{54,2}{46,9}$	$\frac{50,4}{44,7}$	$\frac{-}{42,4}$

Примечание: в числителе – эксперимент, в знаменателе – расчет.

Список литературы

1. Адаскин А. М. Материаловедение и технология материалов / А. М. Адаскин, В. М. Зуев. – М. : Форум, 2010. – С. 184–193.
2. Костиков В. И. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы / В. И. Костиков, А. Н. Варенков. – М. : Интермет Инжиниринг, 2003. – 560 с.
3. Буланов И. М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов / И. М. Буланов, В. В. Воробей. – М. : Изд-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. – 516 с.
4. Бушуев Ю. Г. Углерод-углеродные композиционные материалы / Ю. Г. Бушуев, М. И. Персин, В. А. Соколов. – М. : Металлургия, 1994. – 128 с.
5. Уикс К. Е. Термодинамические свойства 65 элементов, их оксидов, галогенидов, карбидов и нитридов / К. Е. Уикс, Ф. Е. Блок. – М. : Металлургия, 1965. – 240 с.
6. Богачев И. Н. Введение в статистическое материаловедение / И. Н. Богачев, А. А. Вайнштейн, С. Д. Волков. – М. : Металлургия, 1972. – 216 с.
7. Волков С. Д. Статистическая механика композитных материалов / С. Д. Волков, В. П. Ставров. – Минск : БГУ, 1978. – 205 с.
8. Свойства конструкционных материалов на основе углерода : справочник / Под ред. В. П. Соседова. – М. : Металлургия, 1975. – 336 с.
9. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах : справочное издание / В. Е. Зиновьев. – М. : Металлургия, 1989. – 384 с.
10. Мармер Э. Н. Материалы для высокотемпературных вакуумных установок / Э. Н. Мармер. – М. : Физматлит, 2007. – 152 с.

Одержано 13.12.2011

Воденніков С.А., Скачков В.О., Воденнікова О.С., Іванов В.І. Теплофізичні характеристики багатокомпонентних металовуглецевих композиційних матеріалів

Запропоновано моделі прогнозування коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності багатокомпонентних металовуглецевих композиційних матеріалів триботехнічного типу. Виконано експериментальну перевірку запропонованих моделей.

Ключові слова: багатокомпонентний металовуглецевий композит, теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, температура, розрахунок, експеримент.

Vodennikov S., Skachkov S., Vodennikova O., Ivanov V. Thermalphysics characteristics of multicomponent metalcarbon composite materials

Models for prognostication of heat conductivity coefficients and heat capacity for multicomponent metalcarbon composite materials of tribotechnical type were offered. The experimental verification of the offered models was made.

Key words: multicomponent metalcarbon composite, heat capacity, coefficient of heat conductivity, temperature, calculation, experiment.
