

Скачков В.А.,*
Баглюк Г.А.,**
Воденникова О.С.,*
Иванов В.И.*

*Запорожская государственная инженерная академия,

**Институт проблем материаловедения НАНУ

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ЛИНЕЙНОГО ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Введение

Наличие многообразия матричных материалов и схем армирования многокомпонентных металлоуглеродных композитов триботехнического назначения позволяет направленно регулировать различные служебные свойства путем подбора состава, изменения соотношения компонентов и макроструктуры композита. Важнейшей особенностью данных материалов является возможность создания из них элементов конструкций с заранее заданными служебными свойствами [1, 2].

При оценке условий применения данных композитов в узлах трения учитывают их теплофизические характеристики – коэффициент теплопроводности, который обеспечивает отвод тепловой энергии, образующейся в зоне трения, и коэффициент линейного теплового расширения, который учитывается при проектировании узлов трения.

Постановка задачи

Задачей работы является разработка математических моделей прогнозирования указанных теплофизических характеристик многокомпонентных композитов триботехнического назначения и оценка их адекватности на основе экспериментальных результатов.

Результаты исследований

В качестве компонентов исследуемых композитов использовали чешуйчатый и искусственный графит, алюминиевый порошок, оксид алюминия и карбид титана. Для повышения адгезии при формировании более плотной структуры композита на его основные компоненты предварительно наносили гальваническое никелевое покрытие. Состав композитов и исходные данные для расчетов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Состав композитов триботехнического назначения

Компоненты композита	Содержание компонентов, %, по сериям образцов						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
чешуйчатый графит	9,6	4,9	4,9	9,8	4,9	3,8	19,6
искусственный графит	69,6	9,8	-	9,8	9,8	8,5	18,6
алюминий	20,0	85,0	25,0	30,0	15,0	62,4	13,0
оксид алюминия	-	-	70,0	50,0	-	-	-
карбид титана	-	-	-	-	69,7	-	48,0
никель	0,8	0,3	0,1	0,4	0,6	0,3	0,8

Таблица 2

Исходные данные для расчета теплофизических параметров композитов

Компоненты композита	Коэффициент линейного теплового расширения $10^{-6} 1/K$	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м К)				
		температура, К				
		293	373	473	573	673
чешуйчатый графит	5,2	130,0	104,0	97,0	89,0	81,0
искусственный графит	4,0	111,0	104,0	97,0	89,0	81,0
алюминий	22,6	235,0	238,0	234,0	230,0	224,0
оксид алюминия	8,5	32,3	30,0	27,4	27,8	22,2
карбид титана	7,5	25,0	27,0	28,0	29,0	30,0
никель	13,7	90,4	79,7	72,1	63,3	60,9

В рамках среды класса B_2 [3] коэффициент теплопроводности многокомпонентного композита b_{ij} можно записать соотношением:

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

где b_{ij}^k – коэффициент теплопроводности k -го компонента композита;

λ_k – случайная индикаторная функция компонента k [3];

N – число компонентов в композите.

Обобщая результаты работы [4] применительно к многокомпонентным хаотически армированным композитом, получают расчетную формулу для прогнозирования коэффициента теплопроводности:

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

где I_k – коэффициент вариации коэффициента 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 , $D_k^2 = P_k \cdot (1 - P_k)$;

$\langle b_{ij} \rangle$ – среднее значение, полученное осреднением (4).

Используя данные табл. 1 для серий образцов, представленных в табл. 2, по формуле (2) выполнены расчеты коэффициента теплопроводности в интервале температур 293 ... 673 К, результаты которых представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов теплофизических характеристик композита

Образец серии	КЛТР, $10^{-6} 1/K$	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)				
		температура, К				
		293	373	473	573	673
I	2,8046	103,7647	98,1158	92,0616	85,0833	78,0442
II	8,9488	133,0102	132,8044	123,6722	125,5685	121,0313
III	15,2928	27,0266	25,0971	17,9465	20,6592	18,4309
IV	11,4261	36,7755	34,5423	26,9474	27,6077	24,1092
V	11,4716	26,0191	25,5145	22,6171	24,2810	21,6580
VI	6,3955	36,5841	36,2616	32,2828	34,1295	32,9642
VII	9,3383	137,4886	137,5158	128,4794	130,3726	125,8371

Из анализа полученных результатов (табл. 3) следует, что с повышением температуры величина коэффициентов теплопроводности образцов всех серий снижается в среднем на 27 %. При этом максимум снижения величины данного коэффициента наблюдается для образцов серии III (29 %) и IV (32 %), что можно объяснить значительным содержанием в их составе диоксида алюминия (соответственно 70 и 50 %). Кроме того, установлено, что расчетные значения коэффициентов теплопроводности с точностью не ниже 12 % согласуются с величинами, полученными в эксперименте [5].

Случайные модули упругости θ_{ijmn} и коэффициенты линейного теплового расширения (КЛТР) a_{ij} , заданные на элементах второго порядка малости для композитов в виде среды класса B_2 , можно записать как:

$$\theta_{ijmn} = \sum_{k=1}^N \theta_{ijmn}^k \cdot \lambda_k; \quad (3)$$

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

где θ_{ijmn}^k , a_{ij}^k – модули упругости и КЛТР компонента среды с номером k соответственно.

Физическое уравнение для статистической задачи термоупругости в рамках среды класса B_2 с учетом формул (3) и (4) имеет вид:

$$\xi_{ij} = \sum_{k=1}^N \theta_{ij\alpha\beta}^k \cdot \lambda^k \cdot \left(\varepsilon_{\alpha\beta} - \sum_{p=1}^N a_{\alpha\beta}^p \cdot \lambda_p \cdot T \right), \quad (5)$$

где ε_{mn} – случайные микроструктурные деформации.

После осреднения уравнения (5) с учетом статистической независимости θ_{ijmn}^k и a_{ij}^k можно записать:

$$\begin{aligned} \langle \xi_{ij} \rangle &= \sum_{k=1}^N \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \cdot \left(\langle \lambda_k \rangle \langle \varepsilon_{\alpha\beta} \rangle + \langle \lambda_k \cdot \varepsilon_{\alpha\beta} \rangle \right) - \\ &- \sum_{k=1}^N \left(\sum_{p=1}^N \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \langle a_{\alpha\beta}^p \rangle \langle \lambda_k \rangle \langle \lambda_p \rangle + \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \langle a_{\alpha\beta}^k \rangle \langle \lambda_k^2 \rangle \right) \cdot T, \end{aligned} \quad (6)$$

где λ , ε – вариации случайных функций.

Учитывая равенство макроскопических напряжений $\sigma_{ij} = \langle \xi_{ij} \rangle$, а также равенство первого слагаемого в уравнении (6) величине $C_{ij\alpha\beta}^0 \cdot \alpha_{\alpha\beta}^0$, получают:

$$C_{ij\alpha\beta}^0 \cdot a_{\alpha\beta}^0 = \Pi_{ij}, \quad (7)$$

$$\text{где } \Pi_{ij} = \sum_{k=1}^N \left(\sum_{p=1}^N \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \langle a_{\alpha\beta}^p \rangle \langle \lambda_k \rangle \langle \lambda_p \rangle + \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \langle a_{\alpha\beta}^k \rangle \langle \lambda_k^2 \rangle \right);$$

$C_{ij\alpha\beta}^0$, $a_{\alpha\beta}^0$ – макроскопические значения модулей упругости и КЛТР соответственно.

Для хаотически армированных композитов, имеющих изотропные физико-механические характеристики, макроскопические КЛТР определяют из системы уравнений (7) с использованием соотношений:

$$a_{ij}^0 = a^0 \cdot \delta_{ij} = S_{ij\alpha\beta} \cdot \Pi_{\alpha\beta}, \quad (8)$$

где S_{ijmn} – обратная матрица для $\tilde{N}_{ij\alpha\beta}^0$.

Компоненты матрицы S_{ijmn} для изотропных многокомпонентных композитов будут иметь значения:

$$\begin{aligned} S_{iiii} &= \frac{\left[(C_{1111}^0)^2 - (C_{1122}^0)^2 \right]}{D}; \\ S_{ijij} &= \frac{\left[(\tilde{N}_{1122}^0)^2 - \tilde{N}_{1111}^0 \cdot \tilde{N}_{1122}^0 \right]}{D}; \\ D &= (\tilde{N}_{1111}^0)^3 + 2(\tilde{N}_{1122}^0)^3 - 3\tilde{N}_{1111}^0 \cdot (\tilde{N}_{1122}^0)^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Расчетные значения КЛТР для исследуемых серий образцов композитов также приведены в табл. 3.

Как показывают результаты расчетов, величина показателя КЛТР для всех серий образцов композитов изменяется в широком диапазоне - от $2 \cdot 10^{-6}$ до $16,8 \cdot 10^{-6}$ 1/К. Установлено, что при увеличении в композитах содержания алюминиевого порошка величина показателя КЛТР возрастает, что можно объяснить высокими значениями индивидуальных показателей для алюминиевого порошка. Еще большее влияние оказывает оксид алюминия: так при увеличении его содержания от 40 до 80 % значения показателя КЛТР повышаются в 1,30 раза. Сопоставление вычисленных и экспериментальных значений КЛТР указывает на их достаточную сходимость [6].

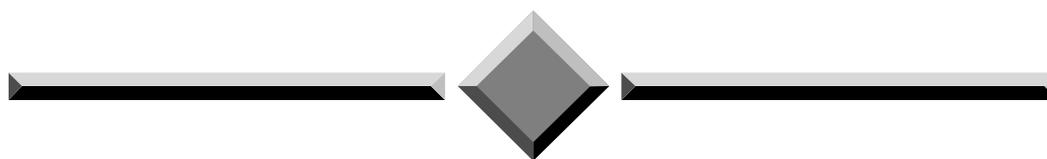
Выводы

Разработаны методики прогнозирования теплофизических характеристик (коэффициентов теплопроводности и линейного теплового расширения) многокомпонентных композитов. Результаты апробации показали, что достаточное согласование экспериментальных и расчетных значений теплофизических характеристик композитов согласуются, степень отклонения не превышает 12 %, что свидетельствует об адекватности разработанных моделей реальному процессу.

Литература

1. Костиков, В.И. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы [Текст] / В. И. Костиков, А.Н. Варенков. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 560 с.
2. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов [Текст] / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – 516 с.
3. Богачев, И.Н. Введение в статистическое материаловедение [Текст] / И.Н. Богачев, А.А. Вайнштейн, С.Д. Волков. – М.: Металлургия, 1972. – 216 с.
4. Волков, С.Д. Статистическая механика композитных материалов [Текст] / С.Д. Волков, В.П. Ставров. – Минск: БГУ, 1978. – 205 с.
5. Теплофизические характеристики многокомпонентных композиционных материалов / С.А. Воденников, В.А. Скачков, О.С. Воденникова, В.И. Иванов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2012. – № 1.
6. 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.

Надійшла 13.04.2012



ЧИТАЙТЕ

журнал

“Problems of Tribology”

во всемирной сети

INTERNET !

<http://www.tup.km.ua/science/journals/tribology/>