

**Розподіл щільності за товщиною вуглепластика після його газозфазного ущільнення**

Відстань від поверхні, мм	Щільність, г/см <sup>3</sup>		
	початкова	розрахункова	фактична
0	1,070	1,293	1,291
2	1,070	1,285	1,282
4	1,070	1,274	1,267
6	1,070	1,257	1,263
8	1,070	1,251	1,252

З метою ідентифікації математичної моделі (12) проведено зіставлення розрахункових значень щільності карбонізованого вуглепластика з фактичними даними, одержаними під час проведення оптико-механічних досліджень (див. таблицю). Розбіжність теоретичних та експериментальних значень щільності не перевищувала 0,6 %, що підтверджує достовірність запропонованої моделі та застосовність її для кількісної оцінки розподілу щільності матеріалу за товщиною стінки карбонізованого вуглепластика під час його ізотермічного ущільнення піролітичним вуглецем із газової фази.

**5. Висновки**

Розроблено математичну модель масоперенесення реагуючих компонентів реакційного газу в термохімічних реакторах проточного типу під час ізотермічного ущільнення карбонізованих вуглепластиків піролітичним вуглецем із газової фази. Результати практичних розрахунків зафіксували

достатній ступінь збіжності теоретичних даних та експериментальних результатів.

**Література**

1. Теснер П. А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы [Текст] / П. А. Теснер. – М.: Химия, 1972. – 136 с.
2. Магарил Р. З. Образование углерода при термических превращениях индивидуальных углеводородов и нефтепродуктов [Текст] / Р. З. Магарил. – М.: Наука, 1973. – 251 с.
3. Макаров К. И. Исследование кинетики термического превращения метана [Текст] / К. И. Макаров, В. К. Печик // Кинетика и катализ. – 1975. – Т. XIV. – Вып. 6. – С. 1484-1500.
4. Дерягин Б. В. Рост алмаза и графита из газовой фазы [Текст] / Б. В. Дерягин, Д. В. Федосеев. – М.: Наука, 1977. – 155 с.
5. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике [Текст] / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1967. – 491 с.
6. Скачков В. А. Моделирование процесса разложения углеводородов в термических реакторах проточного типа [Текст] / В. А. Скачков, В. И. Иванов, В. И. Середич // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 12. – С. 33-35.
7. Скачков В. О. До визначення констант швидкостей гомогенних реакцій піролізу метану [Текст] / В. О. Скачков, В. І. Иванов, Г. В. Карпенко // Матеріали VIII міжнарод. науко-практ. конф. «Образование и наука без границ». – Днепропетровск: Наука и образование, 2005. – Т. 12. – С.

УДК 519.67

# ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**О.С. Воденникова**

Ассистент

Кафедра металлургии черных металлов  
 Запорожская государственная инженерная академия  
 пр. Ленина, 226, м. Запорожье, Украина, 69006  
 Контактный тел.: (06 1) 223-82-250  
 E-mail: mf@zgia.zp.ua

*Представлено результати дослідження багатокомпонентних композиційних матеріалів і розробки математичної моделі прогнозування температурних коефіцієнтів лінійного розширення*

*Ключові слова: композиційні матеріали, прогнозування, теплофізичні характеристики*

*Представлены результаты исследования многокомпонентных композиционных материалов и разработки математической модели прогнозирования температурных коэффициентов линейного расширения*

*Ключевые слова: композиционные материалы, прогнозирование, теплофизические характеристики*

*The results of research of multicomponent composition materials and development of mathematical model of prognostication of temperature coefficients of linear expansion are presented*

*Keywords: composition materials, prognostication, thermophysical characteristics*

**1. Введение**

Среди новых материалов особое место занимают композиционные материалы, обладающие целым комплексом различных свойств, рациональное сочетание которых позволит получать оптимальные конструкции. Экспериментальное определение свойств композиционных материалов, особенно многокомпонентных, требует весьма большого объема экспериментальных исследований. В связи с этим возникает необходимость разработки математических методов прогнозирования функциональных характеристик данных материалов: теплоемкости; теплопроводности; температурного коэффициента линейного расширения. Эти данные нужны также для решения отдельных вопросов теории твердого тела, в частности для формулирования закономерностей, на основе которых можно создавать новые материалы с заданными свойствами [1,2].

**2. Постановка задачи**

Основными задачами данной работы является анализ и обобщение экспериментальных данных дилатометрических исследований проводимых с помощью дифференциально кварцевого dilatометра ДКВ-4; разработка математической модели прогнозирования температурного коэффициента линейного расширения для многокомпонентных композиционных материалов.

**3. Результаты исследования**

Многокомпонентные композиционные материалы были получены путем прессования на гидравлическом прессе ПГПР с нагрузкой до 250 кгс/см<sup>2</sup> в специальной пресс-форме с возможностью регулирования подогрева в процессе прессования до 500 °С. В качестве исходных материалов для получения прессовок многокомпонентных композитов применяли чешуйчатый графит, глинозем, алюминиевый порошок, алюминиевая пудра, карбид титана и графит. Предварительно исходные материалы (чешуйчатый графит, глинозем, карбид титана, графит) подвергали сенсбилизации с помощью хлористого олова для активизации поверхности перед нанесением гальванического никелевого покрытия. Микроструктура композита (чешуйчатый графит, алюминиевый порошок, алюминиевая пудра и графит) представлена на рисунке 1.

Согласно методики [3], образцы многокомпонентных композитов (диаметр 8 мм, высота 22 мм) были подвергнуты дилатометрическим испытаниям и произведен перерасчет результатов на показатели температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Результаты теплофизических исследований представлены в таблице 1. Установлено, что с ростом температуры и времени эксперимента удлинение образца и ТКЛР значительно изменялось.

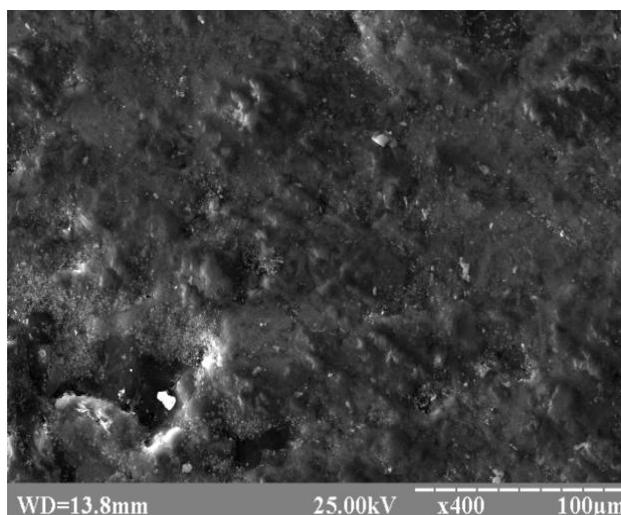
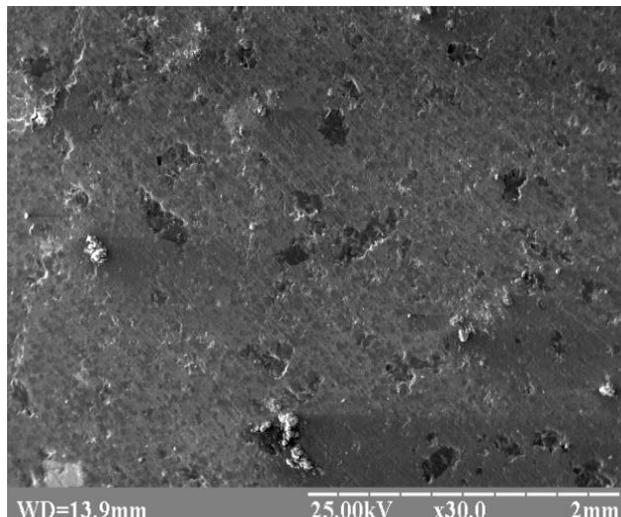


Рис. 1. Микроструктура металлоуглеродного композита

В разработанной модели метода прогнозирования теплофизических характеристик уравнение термopугости записывается в виде:

$$\sigma_{ij} = c_{ij\alpha\beta}^0 (e_{\alpha\beta}^0 - a_{\alpha\beta}^0 \cdot T), \tag{1}$$

где  $\sigma_{ij}$ ,  $e_{mn}$  – макроскопические напряжения и деформации;

$c_{ijmn}^0$ ,  $a_{mn}^0$  – макроскопические модули упругости и коэффициенты линейного теплового расширения (ТКЛР),

$T$  – детерминированная температура.

В уравнении (1) и далее по повторяющимся греческим индексам производится суммирование от 1 до 3.

Представляя многокомпонентные композиционные материалы в виде среды класса  $B_2$  [4], случайные модули упругости ( $Q_{ijmn}$ ) и ТКЛР ( $a_{ij}$ ), заданные на элементах второго порядка малости, можно представить в виде:

$$\theta_{ijmn} = \sum_{k=1}^N \theta_{ijmn}^k \lambda_k ; \tag{2}$$

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^N a_{ij}^k \lambda_k, \quad (3)$$

где  $\theta_{ijmn}^k, a_{ij}^k$  – модули упругости и ТКЛР компонента среды с номером  $k$ , соответственно;  
 $\lambda_k$  – случайная индикаторная функция [4];  
 $N$  – количество компонентов в композиционном материале.

Уравнение термоупругости в рамках среды класса  $B_2$  с учетом (2) и (3) запишется:

$$\xi_{ij} = \sum_{k=1}^N \theta_{ij\alpha\beta}^k \lambda^k \left( \epsilon_{\alpha\beta} - \sum_{p=1}^N a_{\alpha\beta}^p \lambda_p \Gamma \right), \quad (4)$$

где  $\epsilon_{mn}$  – случайные микроструктурные деформации.

Осредняя уравнение (4) и учитывая статистическую независимость  $Q_{ijmn}^k$  и  $a_{mn}^p$ , будем иметь:

$$\langle \xi_{ij} \rangle = \sum_{k=1}^N \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \left( \langle \lambda_k \rangle \langle \epsilon_{\alpha\beta} \rangle + \langle \lambda_k^0 \epsilon_{\alpha\beta}^0 \rangle \right) - \sum_{k=1}^N \left( \sum_{p=1}^N \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \langle a_{\alpha\beta}^p \rangle \langle \lambda_k \rangle \langle \lambda_p \rangle + \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \langle a_{\alpha\beta}^k \rangle \langle \lambda_k^2 \rangle \right) \cdot T, \quad (5)$$

где  $\lambda_k^0, \epsilon_{mn}^0$  – вариации случайных функций.

Учитывая равенство  $\sigma_{ij} = \langle \xi_{ij} \rangle$  и равенство первого слагаемого в уравнении (5) величине  $c_{ij\alpha\beta}^0, a_{\alpha\beta}^0$ , получим:

$$c_{ij\alpha\beta}^0 a_{\alpha\beta}^0 = \Pi_{ij}, \quad (6)$$

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

Для хаотически армированных композиционных материалов имеющих изотропные физико-механические характеристики, макроскопические ТКЛР определяется из системы уравнений (6) по соотношениям:

$$a_{ij}^0 = a^0 \delta_{ij} = S_{ij\alpha\beta} \Pi_{\alpha\beta} \quad (7)$$

где  $S_{ijmn}$  – обратная матрица для  $c_{ijmn}^0$ .

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

$$\begin{aligned} S_{iiii} &= \left[ (c_{1111}^0)^2 - (c_{1122}^0)^2 \right] / D; \\ S_{ijij} &= \left( (c_{1122}^0)^2 - c_{1111}^0 c_{1122}^0 \right) / D; \\ D &= \left( c_{1111}^0 \right)^3 + 2 \left( c_{1122}^0 \right)^3 - 3 c_{1111}^0 \left( c_{1122}^0 \right)^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Результаты теплофизических исследований

Экспериментальные данные			Расчетные данные $\alpha, *10^{-6}K^{-1}$	
Время, мин	Температура, $^{\circ}C$	Удлинение $\Delta, 10^{-5}, м$	По эксперименту	По модели
5	9	-	0	-
10	26	-	0	-
15	53	-	0	-
20	80	0,5	9,048	8,87
25	121	1,0	8,173	8,56
30	186	2,0	7,823	8,29
35	267	2,2	7,732	8,09
40	320	3,0	7,821	8,04
45	413	4,1	5,876	-
50	533	5,0	4,899	-
55	667	5,2	4,058	-

#### 4. Выводы

1. Экспериментальные исследования композиционного материала позволили рассчитать и установить эмпирические закономерности влияния состава композита на показатели ТКЛР.

2. Сравнительный анализ расчетных данных по эксперименту и по модели показал на адекватность разработанной модели, что позволит в дальнейшем проектировать новые материалы с заданными функциональными свойствами без проведения дополнительных испытаний.

#### Литература

1. Бардзокас, Д.И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры [Текст] / Д.И. Бардзокас, А.И. Зобнин. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – с. 374 - Библиогр.: с. 369–374. – ISBN 5-354-00421-7.
2. Новицкий, Л.А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах [Текст] / Л.А. Новицкий, И.Г. Кожевников Справочник. М.: “Машиностроение”, 1975. – С. 48-49. - Библиогр. : с.203-207.
3. Лившиц, Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов [Текст]: учеб. для металлург. спец. вузов / Б.Г. Лившиц, В.С. Краношин, Я.Л. Линецкий; под ред. Б.Г. Лившица. – 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Металлурги, 1980. – 320 с. - Библиогр.: с. 287–288.
4. Богачев, И.Н. Введение в статистическое материаловедение [Текст] / И.Н. Богачев, А.А. Вайнштейн, С.Д. Волков. - М.: Металлургия, 1972. – 216с.