

УДК 620.1:621.762

Онищук О. О., к.т.н. (Луцький національний технічний університет)

ДО РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Робота присвячена методиці моделювання і розрахунку теплофізичних властивостей композиційних матеріалів систем TiFe-xC та TiC-xFe триботехнічного призначення, отриманих високотемпературним синтезом.

Ключові слова: теплофізичні властивості, коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність, густина, триботехнічні матеріали (ТМ), система TiFe-xC, система TiC-xFe, високотемпературний синтез.

Вступ. Сучасний розвиток техніки і машинобудування неможливий без прогресу в галузі розробки якісно нових матеріалів триботехнічного призначення. Застосування титану, залізу, вуглецю, відходів підшипникового виробництва для створення композиційних матеріалів забезпечує зменшення маси, підвищує надійність і довговічність рухомих ущільнень, напрямних втулок, а також знижує їх собівартість. Більшість відомих матеріалів, які працюють у вузлах тертя, мають відносно низьку міцність, теплостійкість, зносостійкість і відзначаються високими значеннями коефіцієнта теплового розширення.

При розробці композиційних матеріалів і технології отримання виробів з них необхідно знати залежності теплопровідності цих матеріалів від хімічного складу та співвідношення компонентів. Вивчення та аналіз теплофізичних властивостей матеріалів дозволяє спрогнозувати їх поведінку в реальних умовах експлуатації [1, 3].

Постановка проблеми та аналіз досліджень. На сьогодні відсутня теорія теплопровідності композиційних матеріалів. Проте є декілька розрахункових формул теплопровідності композиційних матеріалів, що дає змогу розв'язувати задачу порівняння експериментального і емпіричного результатів теплопровідності цих матеріалів.

На сьогодні теплофізичні властивості композиційних матеріалів системи Ti-Fe-C не вивчені та практично не використовують в елект-

ротехнічній індустрії через низькі експлуатаційні характеристики. Тому актуальним завданням сучасного матеріалознавства є розробка нових матеріалів із заданими характеристиками, яким властиві оптимальні теплофізичні показники.

Композиційні матеріали, отримані високотемпературним синтезом, формуються при підвищених температурах і при експлуатації можуть піддаватися температурному впливу, тому вивчення теплофізичних властивостей таких матеріалів має велике практичне значення. При дослідженні основних теплофізичних параметрів: теплопровідність, теплоємність – необхідно врахувати, що їх величина залежить в основному від енергії міжатомної взаємодії і значною мірою визначається хімічним складом матеріалу, співвідношенням компонентів та величиною температури нагрівання.

Високотемпературний синтез здійснюється за рахунок сильноекзотермічних реакцій взаємодії титану, вуглецю, заліза. Фактично, синтез – це процес горіння, теплофізичну модель якого можна описати загальним рівнянням теплопровідності, що визначає закон зміни температури у часі при теплопередачі залежно від теплопровідності [1, 2].

Рівняння теплопровідності в розмірних змінних має вигляд [1, 2, 3]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{n}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q \frac{\partial \dot{a}}{\partial t} \quad (1)$$

рівняння хімічної кінетики [1, 2, 4]:

$$\frac{\partial \dot{a}}{\partial t} = k_0 \exp(-E / RT)(1 - \dot{a}); \quad (2)$$

$$\text{початкові умови: } t = 0, T = T_0 = T_i, \dot{a} = 0; \quad (3)$$

$$\text{граничні умови: } x = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0, x = h_s, -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_0(T - T_0); \quad (4)$$

умови зміни температури навколишнього середовища:

$$T_0(T_i, t) = T_i + \omega t, \quad (5)$$

де T_i – початкова температура, T_0 – температура навколишнього середовища, x – координата, t – час, c , ρ , λ – теплоємність, густина і теплопровідність, Q – тепловий ефект реакції (на одиницю об'єму речовини), h_s – характерний розмір, \dot{a} – прискорення нагріву, n – коефіцієнт форми ($n=1$ для нескінченного циліндра), α_0 – коефіцієнт тепловіддачі, k_0 – передекспонента, E – енергія активації, ω – швидкість нагрівання, R – універсальна газова стала.

Мета роботи. У зв'язку з цим завданням, необхідно визначити оп-

тимальний склад композиційного матеріалу із заданими значеннями теплофізичних властивостей. Отже, основною метою роботи є розрахувати теплофізичні властивості композиційних матеріалів після високотемпературного синтезу та порівняти їх для систем TiC-xFe та TiFe-xC, які зберігають їх поряд з високими антифрикційними властивостями.

Методика розрахунку досліджень. Експериментальні дослідження проводились з матеріалами, які отримали високотемпературним синтезом [4]: система TiC-xFe, яка містить 10%, 20%, 30%, 40% мас. заліза та система TiFe-xC, яка містить 10%, 20%, 30%, 40% мас. вуглецю. Для цих матеріалів був виконаний розрахунок теплофізичних властивостей в діапазоні температур $T_r - T_{\text{свт}}$, тобто в момент протікання синтезу T_r , та в момент його завершення і отримання готових продуктів синтезу $T_{\text{свт}}$.

З рівняння теплопровідності можна знайти такі теплофізичні властивості: густину (ρ), коефіцієнт теплопровідності (λ) і питому теплоємність (C).

Густина сумішей $\rho_{\text{TiC-xFe}}$ і $\rho_{\text{TiFe-xC}}$ розраховувалася за правилом адитивності:

$$\rho_{\text{TiC-xFe}} = \frac{\rho_{\text{Fe}}\rho_{\text{TiC}}}{(1-x_{\text{Fe}})\rho_{\text{Fe}} + x_{\text{Fe}}\rho_{\text{TiC}}}, \quad (6)$$

$$\rho_{\text{TiFe-xC}} = \frac{\rho_{\text{C}}\rho_{\text{TiFe}}}{x_{\text{C}}\rho_{\text{TiFe}} + (1-x_{\text{C}})\rho_{\text{TiFe}}}, \quad (7)$$

де ρ_{Fe} , ρ_{TiC} – густини заліза і системи Ti-C; ρ_{Fe} , ρ_{C} – густини вуглецю і системи Ti-Fe; x_{Fe} – масова концентрація заліза в системі TiC-xFe; x_{C} – масова концентрація вуглецю в системі TiFe-xC.

Припустили, що густина не залежить від температури і агрегатного стану речовин.

Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{\text{TiC-Fe}}$ системи TiC-xFe (як гетерогенної системи) визначали за залежністю [5, 6, 7]

$$\lambda_{\text{TiC-Fe}} = \lambda_{\text{Fe}}(m_{\text{Fe}})^2 + 4m_{\text{Fe}}(1-m_{\text{Fe}})\frac{\lambda_{\text{TiC}}\lambda_{\text{Fe}}}{\lambda_{\text{TiC}} + \lambda_{\text{Fe}}} + \lambda_{\text{TiC}}(1-m_{\text{Fe}})^2, \quad (8)$$

де λ_{Fe} , λ_{TiC} – коефіцієнти теплопровідності заліза *Fe* і *TiC* відповідно, m_{Fe} – об'ємна частка заліза *Fe*, яка залежна від об'ємної концентрації фази TiC. За правилом адитивності m_{Fe} визначається:

$$m_{Fe} = \frac{x_{Fe} \cdot \rho_{TiC}}{x_{Fe} \cdot \rho_{TiC} + (1 - x_{Fe}) \cdot \rho_{Fe}}, \quad (9)$$

де x_{Fe} – масова концентрація заліза Fe в системі $TiC-xFe$; ρ_{Fe} , ρ_{TiC} – густини Fe і TiC відповідно.

Коефіцієнт теплопровідності системи $\lambda_{TiFe-xC}$ $TiFe-xC$ (як гетерогенної системи) визначали за залежністю, описаною в роботах [5, 6, 7],

$$\lambda_{TiFe-xC} = \lambda_C (m_C)^2 + 4m_C (1 - m_C) \frac{\lambda_{TiFe} \lambda_C}{\lambda_{TiFe} + \lambda_C} + \lambda_{TiFe} (1 - m_C)^2, \quad (10)$$

де λ_C , λ_{TiFe} – коефіцієнти теплопровідності вуглецю C і $TiFe$; m_C – об'ємна частка вуглецю, яка злежна від об'ємної концентрації $TiFe$. За правилом адитивності m_C визначається:

$$m_C = \frac{x_C \cdot \rho_{TiFe}}{x_C \cdot \rho_{TiFe} + (1 - x_C) \cdot \rho_C}, \quad (11)$$

де x_C – масова концентрація вуглецю в системі $TiFe-xC$, ρ_{FeTi} , ρ_C – густини вуглецю і системи $TiFe$ відповідно.

Питому теплоємність $C_{TiC-xFe}$ та $C_{TiFe-xC}$ зразків композиційного матеріалу трибо технічного призначення систем $TiC-xFe$ і $TiFe-xC$ відповідно розраховували за правилом адитивності:

$$C_{TiC-xFe} = x_{Fe} C_{Fe} + x_{TiC} C_{TiC} \text{ або } C_{TiC-xFe} = (1 - x_{TiC}) C_{Fe} + x_{TiC} C_{TiC}, \quad (12)$$

$$C_{TiFe-xC} = x_C C_C + C_{TiFe} x_{TiFe} \text{ або } C_{TiFe-xC} = (1 - x_{TiFe}) C_C + C_{TiFe} x_{TiFe}, \quad (13)$$

де $C_{TiC-xFe}$ та $C_{TiFe-xC}$ – питома теплоємність систем $TiC-xFe$ і $TiFe-xC$ відповідно; x_{Fe} – масова концентрація заліза Fe в системі $TiC-xFe$; x_C – масова концентрація вуглецю C в системі $TiFe-xC$; x_{TiC} – масова концентрація TiC в системі $TiC-xFe$; x_{TiFe} – масова концентрація $TiFe$ в системі $TiFe-xC$; C_{TiC} – питома теплоємність системи TiC ; C_{TiFe} – питома теплоємність системи $TiFe$.

Результати розрахунків. При розрахунку густини використовували довідкові дані [8]:

для $Ti-C$ $\rho_{TiC} = 4,92 \cdot 10^3$ кг/м³ і заліза $\rho_{Fe} = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; для $Ti-Fe$ $\rho_{TiFe} = 6,7 \cdot 10^3$ кг/м³ і вуглецю $\rho_C = 2,25 \cdot 10^3$ кг/м³.

Згідно [8] коефіцієнт теплопровідності і питома теплоємність складають при кімнатній температурі:

для заліза $\lambda_{Fe} = 75$ Вт/м·К; $C_{Fe} = 835$ Дж/м·К; для вуглецю $\lambda_C = 1,59$ Вт/м·К; $C_C = 854$ Дж/м·К; для $Ti-Fe$ $\lambda_{Ti-Fe} = 2,1$ Вт/м·К; $C_{Ti-Fe} = 773$ Дж/м·К; для $Ti-C$ $\lambda_{Ti-C} = 11,5$ Вт/м·К; $C_{Ti-C} = 725$ Дж/м·К.

Об'ємна частка вуглецю m_{Fe} та коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{TiC-xFe}$ для системи $TiC-xFe$ отримані розрахунком за формулами (9) та (8) відповідно. Густина $\rho_{TiC-xFe}$ отримана з рівняння (6). Коефіцієнт теплоп-

ровідності є апроксимуючою лінійною залежністю теплофізичних властивостей продуктів СВС від температури. При розрахунках не враховувались залежності густини компонентів від температури і фазового складу (таблиця 1).

Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{TiC-xFe}$ і питома теплоємність $C_{TiC-xFe}$ в досліджуваному інтервалі монотонно зростають зі зростанням температури за законом, який описується лінійною залежністю: $\lambda_1(T) = \lambda_{TiC-xFe} + a \cdot T$, Вт/м·К, де $a=0,01$ – коефіцієнт апроксимуючого рівняння теплопровідності системи TiC-xFe від температури, в Вт/м·К.

Таблиця 1
Теплофізичні властивості СВС-продуктів системи TiC-xFe
в інтервалі $T_r - T_{евт}$ (2073- 2773 К)

№	Шихта	m_{Fe}	ρ_1 , 10^3 кг/м ³	λ_1 , Вт/м·К	$\lambda_{TiC-xFe}$, Вт/м·К	C_1 , Дж/кг·К
1	TiC		4,92	39,23	11,5	725,0
2	TiC-10Fe	0,072	5,12	38,09	13,36	758,0
3	TiC-20Fe	0,153	5,33	37,27	14,54	758,5
4	TiC-30Fe	0,211	5,55	35,79	15,66	763,4
5	TiC-40Fe	0,293	5,79	35,73	16,0	765,0

Об'ємна частка вуглецю m_C та коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{TiFe-xC}$ для системи TiFe-xC отримані з розрахунку за формулою (11) та підстановкою (11) в (10). Густина $\rho_{TiFe-xC}$ отримана з рівняння (7). Коефіцієнт теплопровідності є апроксимуючою лінійною залежністю теплофізичних властивостей продуктів СВС від температури. Густина сумішей системи TiFe-xC $\rho_{TiFe-xC}$ також не залежить від температури і, відповідно, фазового складу продуктів синтезу (табл. 2).

Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{TiFe-xC}$ і питома теплоємність $C_{TiFe-xC}$ в досліджуваному інтервалі аналогічно монотонно зростають зі зростанням температури за законом, який близький до лінійного: $\lambda_2(T) = \lambda_{TiFe-xC} + b \cdot T$, Вт/м·К, де $b=0,01$ – коефіцієнт апроксимуючого рівняння теплопровідності системи TiFe-xC від температури, в Вт/м·К.

На основі отриманих розрахункових значень будуємо залежності коефіцієнта теплопровідності (λ) від температури (T) та залежності питомої теплоємності C від температури T триботехнічного матеріалу систем TiC-xFe та TiFe-xC (рис. 1, 2). Залежність коефіцієнта теплопровідності даних систем в інтервалі температур 1590-2773 К є лінійною (рис. 1).

Таблиця 2

Теплофізичні властивості СВС-продуктів системи TiFe-xC
в інтервалі T_{Γ} - $T_{\text{евт}}$ (1590-2773 К)

№	Шихта	m_c	$\rho_2, 10^3$ кг/м ³	$\lambda_2,$ Вт/м·К	$\lambda_{\text{TiFe-xC}},$ Вт/м·К	$C_2,$ Дж/кг·К
1	TiFe	0	6,70	18,00	2,11	773,0
2	TiFe-10C	0,247	5,61	19,69	1,96	775,9
3	TiFe-20C	0,424	4,82	22,59	1,86	779,5
4	TiFe-30C	0,558	4,87	23,52	1,79	794,4
5	TiFe-40C	0,663	3,76	24,47	1,74	795,0

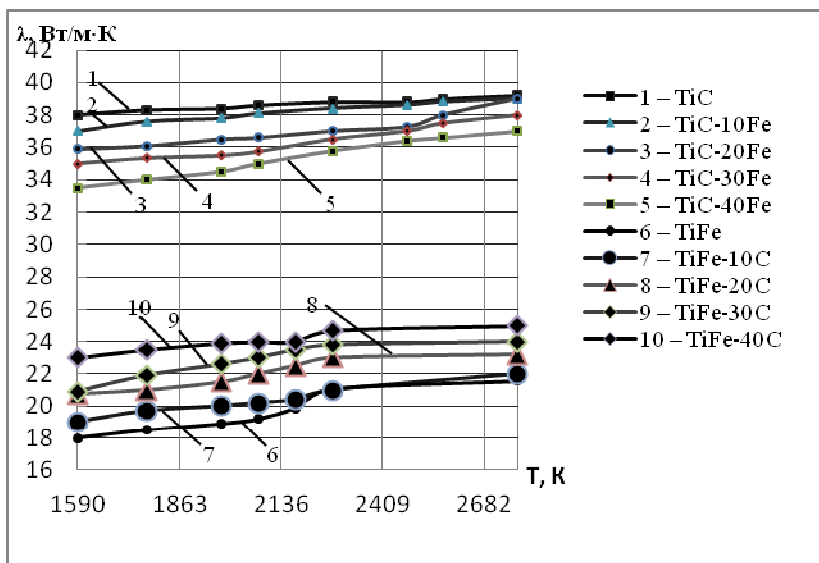


Рис. 1. Залежність коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$ від температури зразка ТМ систем TiC-xFe та TiFe-xC

З отриманих графіків бачимо тенденцію до зростання як коефіцієнта теплопровідності, так і теплоємності зі зростанням температури. Проте, для системи TiC-xFe є характерно більший коефіцієнт теплопровідності практично в 2 рази в інтервалі температур 1590-2773 К, ніж для системи TiFe-xC. Тоді як питома теплоємність в інтервалі температур 1590-2773 К для системи TiFe-xC є більшою в 1,1 раза, ніж для системи TiC-xFe.

Висновки. Отримано теоретично залежності теплофізичних властивостей композиційних матеріалів триботехнічного призначення систем TiC-xFe та TiFe-xC після СВС від температури (в інтервалі 1590-

2773 К). Дані залежності можуть використовуватись при розв'язанні теплових задач нестационарного теплообміну за високотемпературного синтезу. Очевидно, з отриманих розрахунків, маємо, що в діапазоні температур 1590-2073 К композиційний матеріал TiC володіє найвищим коефіцієнтом теплопровідності і найменшою питомою теплоємністю, а TiFe-40C – найбільшою питомою теплоємністю, тоді як TiFe має найменший коефіцієнт теплопровідності.

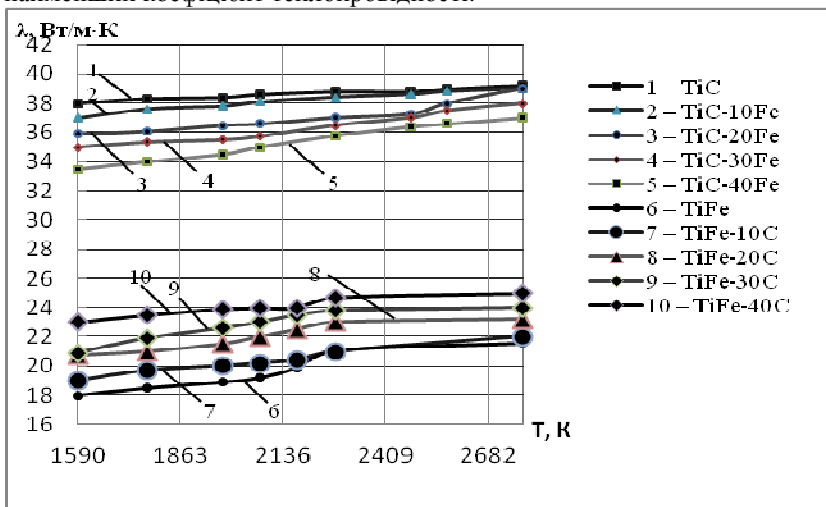


Рис. 2. Залежність питомої теплоємності $C(T)$ від температури зразка ТМ систем TiC-xFe та TiFe-xC

Завдяки своїм теплофізичним властивостям дані розроблені композиційні матеріали, отримані високотемпературним синтезом, здатні забезпечити надійну та довговічну роботу вузлів тертя машин і механізмів.

1. Мержанов А. Г. Твердопламенное горение / А. Г. Мержанов, А. С. Мукасьян. – М. : ТОРУС ПРЕСС, 2007. – 336 с. 2. Мержанов А. Г. Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов / А. Г. Мержанов // Успехи химии. – 2003. – Т. 72. – № 4. – С. 323–345. 3. Новые методы получения высокотемпературных материалов, основанные на горении / А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская, В. И. Юхвид и др. // Научные основы материаловедения. – М. : Наука, 1981. – С. 193–206. 4. Оніщук О. О. Дослідження триботехнічних матеріалів систем TiFe-xC та TiC-xFe, отриманих самопоширюючим високотемпературним синтезом : Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві / О. О. Оніщук // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014 – Вип. 1 (84). – С. 90–95. 5. Савуляк В. І. Деякі питання термодинаміки систем Fe-C-і, де і-третій сильно лікуючий компонент / В. І. Савуляк

// Вісник технічного університету “Поділля”. – 201. – № 1. – С. 180. **6.** Турчанин М. А. Термодинамическое моделирование концентрационных интервалов аморфизации трехкомпонентных металлических расплавов / А. Р. Абдулов, П. Г. Агравал // HighMatTech 2007: международная конференция, 15–19 окт. 2007 г.: тезисы докл. – Киев, 2007. – С. 87. **7.** Stelmakh L. S. Mathematical modeling of thermal regimes of SHS compaction / L. S. Stelmakh, N. N. Zhilyaeva, A. M. Stolin – Inzh.-Fiz., 1992. – v. 63. – № 5. **8.** Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В. Е. Зиновьев // Справочник. – М. : Издательство “Металлургия”, 1989. – 384 с.

Рецензент: к.т.н., доцент Гіроль А. М. (НУВГП)

Onyshchuk O. O., Candidate of Engineering (Lutsk National Technical University)

CALCULATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS FOR TRIBOTECHNICAL PURPOSE

It was investigated that the methodology of modeling and calculation of thermophysical properties of industrial materials tribotechnical purpose of systems TiFe-xC and TiC-xFe, received high-temperature synthesis.

Keywords: thermal properties, thermal conductivity, heat capacity, density, tribotechnical materials, system TiFe-xC, system TiC-xFe, high-temperature synthesis.

Оныщук О. А., к.т.н. (Луцкий национальный технический университет)

К РАСЧЕТУ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Работа посвящена методике моделирования и расчета теплофизических свойств композиционных материалов систем TiFe-xC и TiC-xFe триботехнического назначения, полученных высокотемпературным синтезом.

Ключевые слова: теплофизические свойства, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность, триботехнические материалы, система TiFe-xC, система TiC-xFe, высокотемпературный синтез.
