

УДК 620.22 419:536.2

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВОГО МАТЕРІАЛУ ВВКМ-21 РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ МЕТОДОМ

Боровик Д.В.¹, Євдокименко Ю.І.², Фролов Г.О.³, Круковский П.Г.⁴, Складенко Д.І.⁵¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, вул. Омеляна Прицака, 3, Київ, 03142, Україна, науковий співробітник, orcid.org/0000-0003-4668-3778, e-mail: dmitryb2007@gmail.com²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, вул. Омеляна Прицака, 3, Київ, 03142, Україна, науковий співробітник, [orsid.org/0000-0002-3344-798X](https://orcid.org/0000-0002-3344-798X), e-mail: yevd@meta.ua³докт. техн. наук, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, вул. Омеляна Прицака, 3, Київ, 03142, Україна, завідувач лабораторії матеріалів аерокосмічної техніки ІПМ НАНУ, orcid.org/0000-0001-7045-310X, e-mail: g_frolov@ukr.net⁴докт. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, зав. лабораторії моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях ІТТФ НАНУ, професор, orcid.org/0000-0001-6726-0550, e-mail: kruk_2@ukr.net⁵Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, молодший науковий співробітник, orcid.org/0000-0002-0431-2111, e-mail: cklyr90@bigmir.net<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.4>

Розглянута методика та результати визначення температурних залежностей теплоємності і недостатньо відомої теплопровідності теплозахисного вуглець-вуглецевого матеріалу ВВКМ-21 до 1200 К, який використовується для теплового захисту космічних апаратів. Теплопровідність такого матеріалу має значну залежність від напрямку дії теплового потоку (вздовж або поперек) по відношенню до орієнтації вуглецевих волокон. Теплоємність визначалась за допомогою приладу ІТ-с-400 і універсального розрахункового комплексу «АСТРА 4.0». Теплопровідність визначалась розрахунково-експериментальним методом (температурні вимірювання+моделювання і метод зворотних задач), який дозволив отримати залежності теплопровідності ВВКМ-21 від температури для орієнтацій вздовж волокон в діапазоні $1,9 \div 2,7 \text{ Вт/(м·К)}$ і поперек - в діапазоні $3,2 \div 1,3 \text{ Вт/(м·К)}$.

The methodology and results of determining the heat capacity and thermal conductivity of the thermal protection carbon-carbon composite material CCCM-21 are considered. This material exhibits a significant dependence on the direction of the heat flow relative to the orientation of the carbon fibers and is used for thermal protection of spacecraft up to 1200 K. Heat capacity was determined using the IT-C-400 device and the universal calculation complex «ASTRA 4.0». The inverse heat conduction method was used to obtain the temperature dependence of the thermal conductivity of CCCM-21. For orientations along the fibers, thermal conductivity was measured from 1.9 to 2.7 W/(m·K), and from 3.2 to 1.3 W/(m·K) across the fibers.

Бібл. Бібл. 10, табл. 0, рис. 7.

Ключові слова: вуглець-вуглецевий матеріал, ВВКМ, теплоємність, теплопровідність, розрахунково-експериментальний метод.**Вступ**

Теплові випробування високотемпературних композиційних матеріалів і покриттів проводяться для оцінки їх теплозахисних властивостей і визначення теплофізичних характеристик (ТФХ). Однією з головних ТФХ теплозахисного матеріалу є теплопровідність. Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ) демонструють сильну залежність теплопровідності від температури. Для них є важливим напрям розповсюдження тепла зважаючи на певні схеми розташу-

вання вуглецевих волокон в матриці, що спричиняє відому для них анізотропію властивостей. Крім того, на теплопровідність ВВКМ-21 і теплозахисні властивості покриття з нього впливає інтенсивність і тривалість теплового впливу, окислювальні здатності навколишнього середовища (газового потоку) та його тиск на поверхню матеріалу. Тому найбільшу цінність мають ТФХ, що отримані в умовах, які імітують реальні.

В умовах пічного нагріву температура поверхні зразка, що нагрівається, складала $\sim 1000 \dots 1200 \text{ К}$. Для

більш високих температур в попередніх роботах ми застосовували кисень-пропановий пальник (до ~ 2300 K) та універсальний термоструменевий стенд (УТС), розроблений в ІПМ НАН України. Він дозволяє отримувати температури при струменевому нагріві до ~ 3300 K. Для досягнення такої температури застосовували повітряно-паливні та киснево-паливні пальники, які встановлені на УТС. Взагалі, УТС ІПМ НАН України може використовуватися для проведення експериментальних науково-дослідних та технологічних робіт з використанням термохімічних генераторів високошвидкісних високотемпературних газових потоків, у тому числі гетерофазних [1]. При цьому потрібно враховувати, що нагрівання до високих температур потребує захисту від окислення поверхні зразків з ВВКМ-21. Так в [2] показано, що термоерозійний знос ВВКМ-21 починає помітно проявлятися при температурах вище ~ 1300 K, при яких необхідне застосування захисних покриттів [3]. Наприклад, покриття $ZrB_2-15MoSi$ майже втричі зменшує швидкість лінійного зношування поверхні ВВКМ [3].

Мета роботи: визначити температурні залежності теплоємності і теплопровідності теплозахисного вуглець-вуглецевого матеріалу ВВКМ-21 вздовж і поперек по відношенню до орієнтації вуглецевих волокон в інтервалі 1700 K.

Засоби випробувань зразків

Для вимірювання теплоємності використовувався стандартний прилад ІТ-с-400 [4]. Для пічного нагріву було застосовано модернізовану муфельну піч МП-80. Піч оснащена нагрівачами із фехралевого дроту загальною потужністю 2 кВт. Вони розташовані на її бічній поверхні. Автоматика печі виконана на базі терморегулятора UDS-220.R Pid-1345, призначеного для авто-

матичного регулювання температури об'єкта методом двопозиційного регулювання. Пристрій розрахований для роботи з термопарами типу ТХА (К), ТХК (L) до ~ 1370 K. Він забезпечує автоматичне утримання заданої температури в зоні нагріву. До складу керуючого модулю входить семистор з потужністю до 5 кВт. За допомогою нього підтримується температура у печі за встановленим значенням.

Температуру у печі та на зразках вимірювали термоелектричними перетворювачами (термопарами) типу (хромель-алюмель, діаметр дротів 0,3 мм). Для реєстрації температур застосовується аналоговий перетворювач АКОН-Т [5]. Він складається з адаптеру інтерфейсів WAD-RS-232/USB/485-BUS та двох чотирьох каналних модулів аналогового введення. Вони виконані з поканальною гальванічною розв'язкою вхідних каналів. Керування та налаштування системи реєстрації температур відбувається за допомогою штатної програми «АКОН-Адміністратор». Вона інсталується, як звичайна програма на комп'ютері користувача. Програма дозволяє налаштувати потрібні канали для кожного типу термопар, відображати в режимі реального часу графіки показів з датчиків, підключених до перетворювача, записувати ці дані у файли та візуалізувати їх у графічному вигляді з раніше створених файлів.

Коефіцієнт теплопровідності ВВКМ-21 визначали за схемою, що зображена на рис. 1, а. Фото зразка наведено на рис 1, б.

Для визначення теплопровідності використовувався пакет із двох пластин, нагрітих ззовні газовим середовищем: повітрям на початку експерименту та сумішшю азоту, вуглекислого і чадного газу після окислення вуглецю. Для ізоляції внутрішніх поверхонь від розігрітого

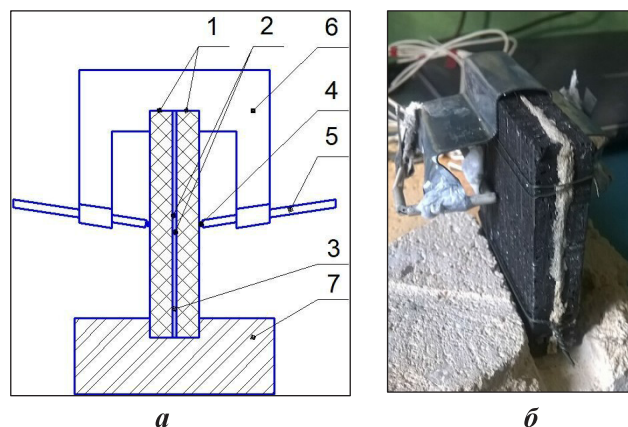


Рис. 1. Схема визначення коефіцієнта теплопровідності ВВКМ-21 (а) та фото зразка (б): 1 – зразок з двох пластин; 2 – дві внутрішні термопари; 3 – прошарок асбокартону; 4 – зовнішні термопари; 5 – чохла термопар; 6 – кріплення термопар; 7 – підставка

газу між пластинами розміщували прошарок азбокартону, а температури під час нагрівання фіксували термопарами на внутрішній 2 та зовнішній 4 поверхнях (рис. 1).

Визначення питомої теплоємності вуглець-вуглецевих матеріалів

Теплоємність ВВКМ-21 при температурах 300...800 К визначали в даній роботі експериментально на приладі ІТ-с-400 [4], а при температурах 300...1300 К – за допомогою програми «АСТРА 4.0» [7]. Слід зазначити, що експериментальна і розрахункова теплоємності ВВКМ-21 при відповідних температурах майже не відрізняється.

В основу алгоритму багатоцільового програмного комплексу «АСТРА 4.0» покладено універсальний термодинамічний метод визначення характеристик рівноваги довільних гетерогенних систем, заснований на фундаментальному принципі максимуму ентропії. Цей метод представляє унікальну можливість узагальненого опису будь-якого високотемпературного стану за допомогою тільки фундаментальних законів термодинаміки, незалежно від умов і способів досягнення рівноваги. Метод вимагає мінімальної інформації про саму систему і про її оточення. Основу інформації в базі даних складають термодинамічні, теплофізичні і термохімічні властивості індивідуальних речовин.

Більша частина необхідних відомостей для неї зібрана в матеріалах Національного бюро стандартів США [7]. Решта – отримана з опублікованих у періодичній пресі, монографіях і довідниках.

Температурні криві питомої теплоємності для вуглецевих матеріалів типу ВВКМ наведені на рис. 2.

Визначення коефіцієнта теплопровідності

Початкове значення коефіцієнту теплопровідності ВВКМ-21 на першому ітераційному кроці моделювання було прийнято рівним 100 Вт/(м•К), яке відповідає середньому коефіцієнту теплопровідності графіту при температурах 200...1000 К.

Відомо, що коефіцієнт теплопровідності композиційних матеріалів залежить від структури матеріалу, орієнтації напрямку градієнту температури відносно схеми розташування вуглецевих волокон в матриці, темпу нагрівання, тощо. Тому стандартний прилад ІТ-λ-400 [4], в якому відбувається об'ємне нагрівання з невеликою швидкістю 5 град/хв, не може забезпечити отримання значення теплопровідності, що відповідають експлуатаційним умовам. Коефіцієнт теплопровідності, який значно ближче відповідає робочим умовам, повинен бути визначений при високотемпературному однобічному нагріванні зі швидкостями, що набагато перевищують можливості приладу ІТ-λ-400.

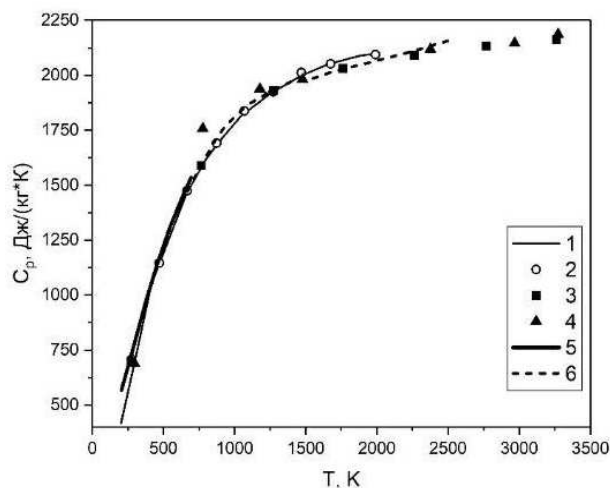


Рис. 2. Залежності питомої теплоємності вуглецевих матеріалів від температури:

- 1– ВВКМ (апроксимація поліномом 200...2000 К) 2– дрібнозернистий (кристалічний) графіт МПГ-6 (довідкові дані) (200...1700 К) [8]. 3– ВВКМ КІМФО-МБ (експериментальні дані) з Баз даних ІПМ НАНУ (300...3270 К); 4– ВВКМ УПА-3 (експериментальні дані) з Баз даних ІПМ НАНУ (300...3270 К); 5– експериментальні дані для досліджуваного матеріалу ВВКМ-21, отримані на ІТ-с-400 (570...670 К); 6– вуглець (дані термодинамічного розрахунку з використанням ПЗ «АСТРА 4.0»)

Блок ВВКМ-21 із взаємно перпендикулярною орієнтацією волокон в площині ХУ був використаний для виготовлення 6 зразків у вигляді пластин з розмірами 60×60×6 мм для дослідження температурних полів у двох напрямках – перпендикулярно площинам ХУ і ХZ (рис. 3). Частину зразків маркували ХУ (напрямок розповсюдження тепла співпадає з віссю Z), інші зразки маркували ХZ (напрямок розповсюдження тепла співпадає з віссю Y).

Експерименти проводилися в умовах пічного нагріву в модернізованій муфельній печі МП-80.

Методика визначення теплопровідності ВВКМ-21 у заданому температурному діапазоні базується на комп'ютерному моделюванні теплового стану зразків та подальшому розрахунку залежності коефіцієнта теплопровідності від температури методом зворотних задач [9]. Для цього використовували експериментальні дані температур на гарячій (1) та внутрішній (2) поверхнях зразка (рис. 1). Початкова температура зразка T_0 задає початкову умову, а в якості граничних умов прийняті: експериментальна залежність температури нагрітої поверхні від часу та теплоізоляція внутрішньої поверхні. Індикаторна температура внутрішньої поверхні слугує для розрахунку квадратичної похибки між нарахованою та експериментальною температурами. Модель однобічного нагрівання нескінченної теплоізоляційної пластини (1) застосовується для визначення коефіцієнта теплопровідності ВВКМ-21 в умовах пічного нагріву до 1200 К:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad x \in (0, L), t \in (0, t_{\text{end}}) \quad (1)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c},$$

де a – температуропровідність; λ – коефіцієнт теплопровідності, що залежить від температури;

ρ – щільність; c – теплоємність; L – товщина пластини; t_{end} – час випробувань;

граничні умови: $(0, t)=0, t \in (0, t_{\text{end}}), T(L, t)=0, t \in (0, t_{\text{end}})$, початкова умова: $T(x, 0) = T_0$ – початкова температура зразка.

Визначення коефіцієнта теплопровідності у рівнянні (1) проводили пошуком такої його залежності від температури, для якої середньоквадратичне відхилення F в (2) розрахункових температур $T_M(l, t)$ у моделі (2) та експериментальних значень температур $T_Y(l, t)$ було мінімальним [9].

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (T_{M,j} - T_{Y,j})^2}{m}} \approx \delta, \quad (2)$$

де m – число експериментальних вимірів, що використані для вирішення зворотної задачі; δ – середньоквадратична похибка вимірювання температури $T(L, t)$.

Для розрахунку також необхідне знання густини зразка $\rho_0(T)$ та залежності його питомої теплоємності від температури $C_p(T)$. Зазначений набір даних дозволяє однозначно визначити залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалу, що вивчається, у діапазоні температур: від початкової до максимально досягнутої на поверхні зразка.

Таким чином, в експерименті були забезпечені однобічне нагрівання поверхні пластини зразка однорідним тепловим потоком та теплоізоляція її холодної поверхні з вимірюваннями температур обох поверхонь у процесі нагрівання. Виконання цих умов при пічному нагріванні пакету з двох пластин зразків



а



б

Рис. 3. Зразки ВВКМ-21 з орієнтацією ХУ(а) та ХZ(б) до випробувань

дозволяє повністю виключити теплові втрати з їх холодних (внутрішніх) поверхонь, див. рис. 1.

Важливо зазначити, що розрахунок проводили за припущеннями:

1) матеріал не зазнає фізико-хімічних змін у діапазоні досліджуваних температур, а після охолодження теплофізичні властивості залишаються незмінними;

2) температурне розширення і відповідне зниження щільності матеріалу мають незначний вплив на теплопровідність і тому не враховуються;

3) поверхнєве окислення матеріалу при нагріванні в повітряному середовищі також відсутнє;

4) структура матеріалу в межах одного зразка однорідна, тобто має однакові теплофізичні властивості.

Модель, що задовольняє вказаним умовам, може бути реалізована в будь-якому доступному користувачеві програмному комплексі, що забезпечує вирішення диференціальних рівнянь у часткових похідних (ANSYS, SIMULIA, COMSOL [10]).

Типові значення отриманих похибок наступні: $\pm 1^\circ$ до ~ 300 К, $\pm 2^\circ$ до ~ 900 К, $\pm 5^\circ$ до ~ 1300 К і $\pm 10^\circ$ при температурах понад 1300 К.

На рис. 4 показаний зовнішній вигляд зразків ВВКМ-21 після випробувань

З метою перевірки одновимірності характеру розподілу температури по товщині зразка виконані тестові розрахунки для зразків у вигляді квадратних пластин з шириною, що на порядок перевищує товщину. Виявлено, що навіть, в умовах відсутності теплової ізоляції бічних граней зразка, він демонструє одновимірний характер розподілу температури в центральній своїй частині. Прикладом цього є отримані розрахункові температурні поля для зразка у формі диска діаметром 60 мм та товщиною 6 мм при пічному нагріванні при температурі печі ~ 1300 К (рис. 5).

В центральній частині диска (приблизно до половини його радіусу) температурне поле в диску з площиною, що нагрівається, практично не відрізняється від поля в диску з ізольованою площиною (рис. 5). Це дозволяє рахувати одновимірним розподіл температури в центральній частині зразка протягом всього часу нагріву. У цьому випадку похибка визначення коефіцієнта теплопровідності визначається виключно точністю вимірювання і реєстрації температур гарячої та холодної поверхонь пластини в її центральній зоні.

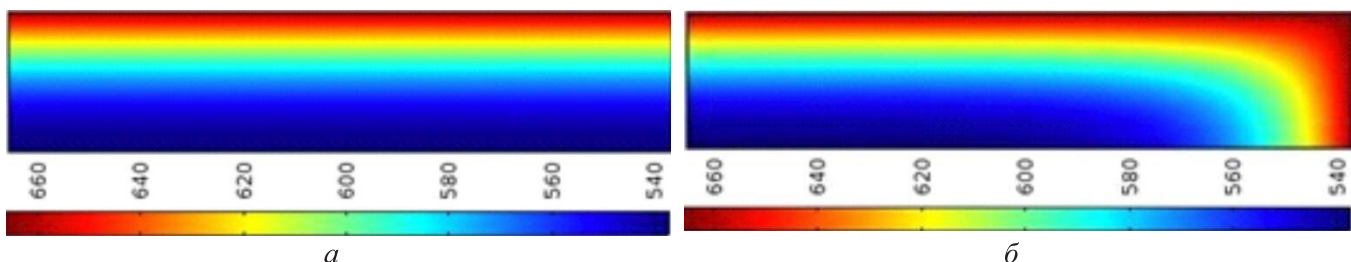


а



б

Рис. 4. Зразки ВВКМ-21 з орієнтацією XY(а) та XZ(б) після випробувань



а

б

Рис. 5. Температурні поля при одnobічному нагріванні диска з ВВКМ-21 діаметром 60 мм (лівий край зображення $R=0$, правий $R=30$ мм): а – теплоізольована нижня та бічна поверхня диска, 50 с нагрівання; б – теплоізольована нижня поверхня диска, нагрівання бокової поверхні за тим же законом, що і верхня, 50 с нагрівання

Приклади телеметрії, яку реєстрували під час проведення експериментів по нагріву у печі зразків матеріалу ВВКМ-21 різної орієнтації наведені на рис. 6.

Залежності коефіцієнтів теплопровідності для різних орієнтацій вуглецевих волокон наведені на рис. 7. З них можна бачити, що зразки з орієнтацією XY із зростанням температури демонструють збільшення коефіцієнту теплопровідності, а з орієнтацією XZ демонструють спочатку його зменшення до ~ 650 K, а

потім коефіцієнт теплопровідності поступово росте майже лінійно. Це картина типова для анізотропних матеріалів. Раніше (в частині «Визначення коефіцієнта теплопровідності») ми відзначали, що викладену методику можна застосовувати, якщо не порушено 4 умови. У нашому випадку для зразків з орієнтацією XZ за час нагрівання протягом 250 с спостерігається сильна зміна зовнішнього вигляду їх поверхні (див. рис. 3 і 4). Так як окислення матеріалів на основі вуглецю починається

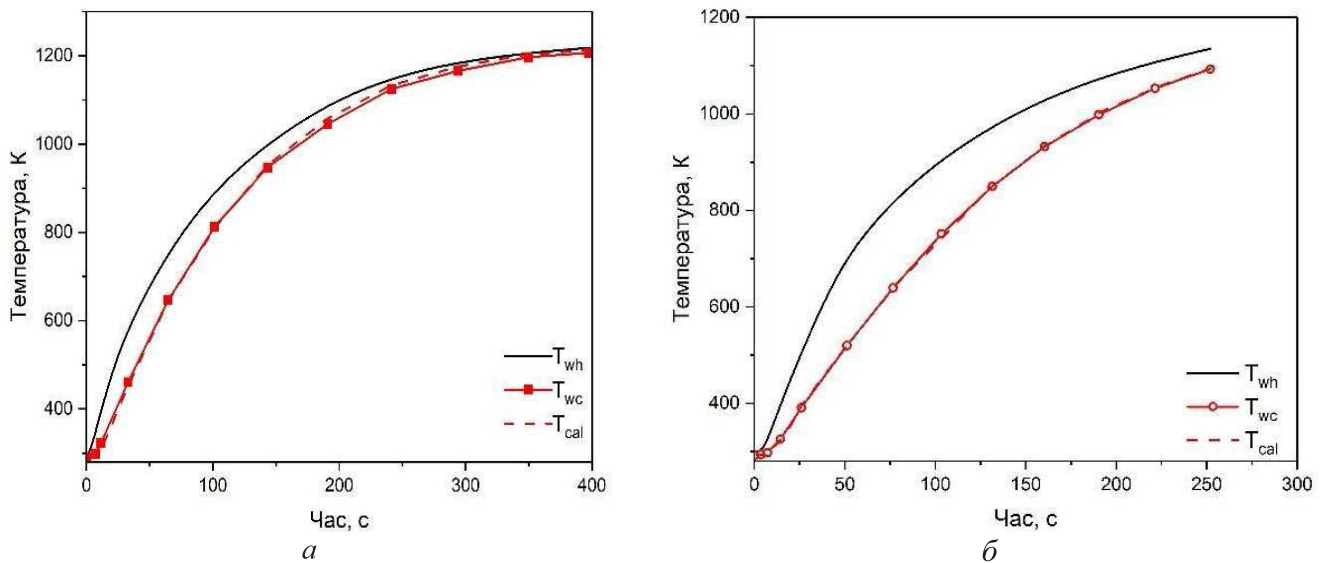


Рис. 6. Залежності температури від часу при нагріванні в печі для зразків ВВКМ-21 орієнтацій а – XY та б – XZ: T_{wh} – температура на зовнішній поверхні зразка; T_{wc} – температура на внутрішній поверхні зразка; T_{cal} – розрахункова температура

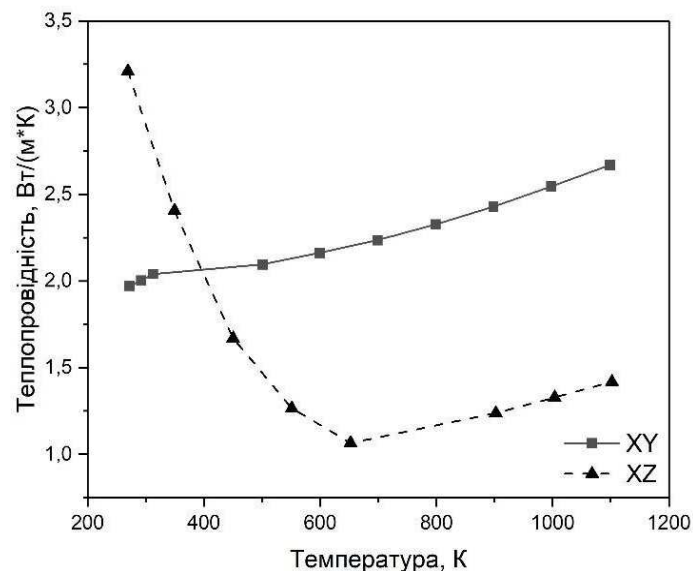


Рис. 7. Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури для матеріалу ВВКМ-21 з орієнтацією: XY та XZ

з ~ 1000 К, а тривалість нагріву становить приблизно 300с, то не виконується перша та третя умови. Для зразків з орієнтацією XZ після окислення матриці (на рис. 4 залишаються тільки вуглецеві волокна) функція коефіцієнта теплопровідності стає майже лінійною.

Висновки

1. Отримана залежність питомої теплоємності теплозахисного вуглець-вуглецевого матеріалу ВВКМ-21 при даних умовах випробувань добре співпадає з відомими результатами подібних матеріалів.

2. Використаний в роботі розрахунково-експериментальний метод, який поєднує температурні вимірювання, моделювання теплового стану зразків і метод зворотних задач, дозволив в інтервалі температур до 1200 К отримати залежності теплопровідності вуглець-вуглецевого матеріалу ВВКМ-21 від температури для орієнтацій вздовж волокон в діапазоні $1,9 \div 2,7$ Вт/(м·К) і поперек – в діапазоні $3,2 \div 1,3$ Вт/(м·К).

3. Подальші дослідження плануються з використанням термоструменевого стенду ІІМ НАН України для визначення теплопровідності ВВКМ-21 до 3300 К при різних схемах розташування і орієнтації волокон.

ЛІТЕРАТУРА

1. Евдокименко, Ю. И. Горелочное устройство двухкаскдной конфигурации для высокоскоростного воздушно-топливного напыления на жидком топливе [Текст] / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, Г. А. Фролов, С. В. Бучаков // Вісник двигунобудування. – 2015. – №2. – С. 143-148. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vidv_2015_2_27.
2. Borovyk, D. Determination of the thermophysical characteristics of composite materials at high temperatures [Text] / D. Borovyk, Y. Yevdokymenko, G. Frolov // Aerospace Technic and Technology. – 2024. – Vol. 0, № 4sup1. – P. 89-99. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.4sup1.13>.
3. Фролов, Г. А. Результаты испытаний покрытий на основе диборида циркония на углерод-углеродных подложках для тепловой защиты изделий ракетно-космической техники [Текст] / Г. А. Фролов, Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, С. В. Бучаков // Вісник двигунобудування. – 2018. – №2. – С. 186-195. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vidv_2018_2_29.
4. Волков, Д. П. Приборы и методы для измерения теплофизических свойств веществ [Текст] / Д. П. Волков, В. А. Кораблев, Ю. П. Заричняк. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 66 с. – Режим доступа: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/92.pdf>.
5. Техническое описание WAD-AIK12-BUS TY U 33.2-33056998-001:2009 [Электронный ресурс] / АКОН. – 2015. – Режим доступа: https://www.akon.com.ua/download/products/teh_op/teh_op
6. Синярев, Г. Б. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов [Текст] / Г. Б. Синярев, Н. А. Ватолин, Б. Г. Трусов, Г. К. Моисеев. – М.: Наука, 1982. – 263 с. – Режим доступа: <http://ir.nmu.org.ua/handle/GenofondUA/31983>.
7. JANAF Thermochemical tables: 2nd edition [Text]. – NSRDS-NBS 37. – Washington: US Gov. Print. Office, 1971. – 1141 p. – Available at: <https://srds.nist.gov/NSRDS/NSRDS-NBS37.pdf>.
8. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники [Текст] / В.С. Чиркин. – М.: Атомиздат. – 1967. – 474 с.
9. Круковский, П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) [Текст] / П. Г. Круковский. – Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998. – 218 с.
10. Pryor, R. W. Multiphysics Modeling Using Comsol V.4: A First Principles Approach [Text] / R. W. Pryor. – Mercury Learning & Information; HAR/DVD edition, 2011. – 700 p. – Available at: <https://dl.poweren.ir/downloads/PowerEn/Book/2019/.pdf>.

DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF CARBON-CARBON MATERIALS BY A COMPUTATIONAL-EXPERIMENTAL METHOD

D.V. Borovyk¹, Yu.I. Yevdokymenko²,
P.G. Krukovsky³, G.O. Frolov¹, D.I. Skliarenko⁵

¹*Institute for Problems of Materials Science of I.M. Frantsevich NAS of Ukraine, 3, str. Omeliana Pritsaka, Kyiv, 03142, Ukraine, scientific, orcid.org/0000-0003-4668-3778, e-mail: dmitryb2007@gmail.com*

²*Institute for Problems of Materials Science of I.M. Frantsevich NAS of Ukraine, 3, str. Omeliana Pritsaka, Kyiv, 03142, Ukraine, scientific, orcid.org/0000-0002-3344-798X, e-mail: yevd@meta.ua*

³*Dr. Sci. (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of heat and mass transfer modeling laboratory for energy objects and thermal technologies IETP NASU, professor, orcid.org/0000-0001-6726-0550, e-mail: kruk_2@ukr.net*

⁴*Dr. Sci. (Engin.), Institute for Problems of Materials Science of I.M. Frantsevich NAS of Ukraine, 3, str. Omeliana Pritsaka, Kyiv, 03142, Ukraine, Head of Laboratory of materials of aerospace technology of IPMS NASU of I.M. Frantsevich, orcid.org/0000-0001-7045-310X, e-mail: g_frolov@ipms.kyiv.ua*

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of heat and mass transfer modeling laboratory for energy objects and thermal technologies IETP NASU, Junior Research Associate, orcid.org/0000-0002-0431-2111, e-mail: cklyr90@bigmir.net

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.4>

The continuous improvement of thermal protection efficiency for rocket and space technology (RST) components is a key aspect of progress in this field. Today, carbon-carbon composite materials (CCCM) are increasingly becoming the standard in thermal protection systems. Simultaneously, CCCMs are being used more frequently in devices for testing RST materials and evaluating component durability. For instance, CCCMs serve as structural and heating elements in vacuum furnaces under high mechanical and thermal loads. The expanding application of such materials requires

enhancements to existing methods and the development of new approaches for studying and determining their thermophysical properties. This paper addresses this need by investigating heat propagation in flat CCCM samples with different fiber orientations in the matrix using a combined experimental-computational method to determine their heat capacity and thermal conductivity in the temperature range of 300–1200 K. The study involved furnace heating of CCCM samples, with the selected temperature range justified by the onset of thermoerosion at 1200 K for CCCMs. Temperatures up to 1200 K with heating durations of up to 60 seconds typically do not cause significant surface degradation. Heat capacity was determined at temperatures up to 700 K using the IT-c-400 device and calculated up to 2000 K using the «ASTRA 4.0» software. Thermal conductivity was obtained through a computational-experimental approach, employing a heat conduction model and an inverse problem methodology. Experimental temperatures from two surfaces of a flat sample during one-sided heating were used to solve the inverse problem. The COMSOL Multiphysics® software package, an integrated platform for modeling physical processes (including heat transfer) in environments and objects of various geometries, was employed for the calculations.

References 10, tables 0, figures 7.

Key words: carbon-carbon composite material, CCCM, heat capacity, thermal conductivity, calculation and experimental method.

1. Yevdokymenko, Yu.I., Kysel, V.M., Frolov, H.A., Buchakov, S.V. Horelochne ustroistvo dvuhkaskadnoi konfiguratsii dlya vysokoskorostnogo vozdušno-toplivnogo napyleniya na zhydkom toplyve [Burner Device of a Two-stage Configuration for High-speed Air-fuel Spraying on Liquid Fuel]. Visnyk dvynhunobuduvannya, 2015, No. 2, pp. 143-148. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vidv_2015_2_27 (in Ukr.)

2. Borovyk, D., Yevdokymenko, Yu., Frolov, G. Determination of the thermophysical characteristics of composite materials at high temperatures. Aerospace Technic and Technology, 2024, Vol. 0, No. 4sup1, pp. 89-99. doi:10.32620/akt.2024.4sup1.13

3. Frolov, H.A., Yevdokymenko, Yu.I., Kysel, V.M., Buchakov, S.V. Rezultaty ispytaniy pokrytii na osnove dyboryda tsirkoniya na uglerod-uglerodnykh podlozhkakh dlya teplovoi zashchity izdelii raketno-kosmicheskoi tekhniki [Test Results of Zirconium Diboride-based Coatings on Carbon-carbon Substrates for Aerospace Thermal Protection]. Visnyk dvynhunobuduvannya, 2018, No. 2, pp. 186-195. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vidv_2018_2_29 (in Ukr.)

4. Volkov, D.P., Korablev, V.A., Zarichnyak, Yu.P. Pribory i metody dlya izmereniya teplofizicheskikh svoistv veshchestv [Instruments and Methods for Measuring the Thermophysical Properties of Substances]. Metod. ukaz. St. Petersburg: SPb GU ITMO, 2006, 66 p. Available: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/92.pdf> (in Rus.)
5. Tekhnicheskoe opisanie WAD-AIK12-BUSTU U 33.2-33056998-001:2009 AKON [Technical Description WAD-AIK12-BUS TU U 33.2-33056998-001:2009 AKON]. Akon, 2015. [Electronic resource]. Available: https://www.akon.com.ua/download/products/teh_op/teh_op (in Ukr.)
6. Syniaren, H.B., Vatolin, N.A., Trusov, B.H., Moiseev, H.K. Primeneniye EVM dlya termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh protsessov [Application of Computers for Thermodynamic Calculations of Metallurgical Processes]. Moscow: Nauka, 1982, 263 p. Available: <http://ir.nmu.org.ua/handle/GenofondUA/31983> (in Rus.)
7. JANAF Thermochemical tables: 2nd edition. NSRDS-NBS 37. Washington: US Gov.Print.Office, 1971, 1141 p. Available: <https://srd.nist.gov/NSRDS/NSRDS-NBS37.pdf>
8. Chirkin, V.S. Teplofizicheskie svoistva materialov yadernoi tekhniki [Thermophysical Properties of Nuclear Engineering Materials]. Moscow: Atomizdat, 1967, 474 p. (in Rus.)
9. Krukovsky, P.H. Obratnye zadachi teplomassoperenosa (obshchii inzhenernyi podkhod) [Inverse Problems of Heat and Mass Transfer (General Engineering Approach)]. Kyiv: Institute of Technical Thermophysics, NAS of Ukraine, 1996, 218 p.
10. Pryor, R.W. Multiphysics Modeling Using Comsol V.4: A First Principles Approach. Mercury Learning & Information; HAR/DVD edition, 2011, p. 700. Available: <https://dl.poweren.ir/downloads/PowerEn/Book/2019/.pdf>

Отримано 04.11.2024

Received 04.11.2024

Прийнято до друку 14.11.2024

Accepted for publication 14.11.2024