УДК 536.2.083 **doi: 10.32620/aktt.2025.4sup2.06**

Д. В. БОРОВИК[1], Ю. І. ЄВДОКИМЕНКО[1], Г. О. ФРОЛОВ[1], О. Д. КОЛОТИЛО[1], О. М. ПОТАПОВ[2], Н. І. СУЕТОВА[2]

[1] ***Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної Академії наук України, Київ, Україна***
[2] ***Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпро, Україна***

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Представлено експериментально-розрахункову методику визначення теплопровідності та теплоємності теплоізоляційних матеріалів (TIM) при високих температурах. Проведено порівняння визначених теплофізичних характеристик із відомими для аналогічних матеріалів. Досліджено матеріали TIM ZYF-150 та NAB (виробник – ZIRCAR Ceramics, Inc., США). Вони мають волокнисту високопористу структуру, нагадують повсть і легко заповнюють певний об'єм і форму. Волокна в матеріалі ZYF-150 – з діоксиду цирконію (ZrO_2), що стабілізований оксидом ітрію (Y_2O_3). Матеріал NAB утворює волокна з оксиду алюмінію (Al_2O_3) з домішками оксиду кремнію (SiO_2). Нагрів зразків у експериментах здійснювали струменем пропан-кисневого пальника в режимі відновного полум'я із застосуванням прокладки з вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу (ВВКМ). Вона забезпечувала відсутність прямого механічного впливу струменя пальника на поверхню зразка та ефективну контактну теплопередачу. Числове моделювання нагріву зразків виконували методом скінченних елементів із використанням програмного пакету COMSOL Multiphysics®. Експериментально отримані температури поверхонь зразків використовували як граничні умови при розв'язанні зворотної задачі теплопровідності. У результаті отримано температурні залежності коефіцієнта теплопровідності (ТЗКТ) зразків матеріалів ZYF-150 та NAB. Вони мають задовільний збіг із паспортними даними в дослідженому інтервалі температур. Для матеріалу NAB (λ_{NAB5}) середнє квадратичне відхилення становить 15,5 %, з максимальною відносною похибкою 23,6 %, а для матеріалу ZYF-150 відповідні значення склали 21,5 % і 44 %. Порівняльний аналіз характеристик досліджених і відомих аналогічних матеріалів підтверджує коректність розробленої методики. Отримані результати можуть бути корисними для фахівців у сфері матеріалознавства теплозахисних матеріалів і при розробці систем теплозахисту на їх основі.

Ключові слова: *теплозахисний матеріал; теплоємність; теплопровідність; моделювання; лінійний знос; газовий пальник; пірометр; ВВКМ.*

Вступ

Розробка та дослідження матеріалів для теплового захисту ракетно-космічної техніки залишається актуальним завданням сучасного матеріалознавства. Для шарів теплозахисних систем використовують різні матеріали, що найкращим чином виконують певні специфічні функції. У багатошарових системах теплозахисту термічному руйнуванню внутрішніх теплоізоляційних шарів протидіють щільні зовнішні. Високопористі теплоізоляційні компоненти знижують теплообмін та стабілізують внутрішню температуру апарату. Їх проміжні теплоізоляційні прошарки оберігають несучу конструкцію від термічного впливу. Зокрема, останнім часом перспективними вважаються теплоізоляційні матеріали на основі стабілізованих твердих розчинів оксиду ітрію у діоксиді цирконію («yttria stabilized zirconium oxide» – YSZ), які забезпечують високу термостійкість та ефективність у складі комплексних захисних систем.

Композити на основі Al_2O_3 також знаходять широке застосування у сфері теплозахисту, хоча їх максимальні робочі температури дещо нижчі порівняно з матеріалами на основі YSZ.

У роботі автори дослідили теплофізичні властивості TIM ZYF-150 та NAB, створених відповідно на основі YSZ та Al_2O_3. Структура обох матеріалів нагадує повсть – це волокнисті пористі структури, що легко змінюють об'єм та форму. У складі теплозахисної системи апарата вони виконують роль наповнювача, який не несе механічних навантажень, а виконує винятково функцію термоізоляції. Разом із конструктивними елементами, що сприймають механічні навантаження, вони формують єдину систему теплозахисту апарата.

Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

У роботі автори навели результати дослідження температурної залежності теплофізичних властивостей зазначених матеріалів та їх порівняння з аналогами.

1. Визначення коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів ZYF-150 та NAB у діапазоні температур до 2000 °С

1.1. Об'єкт випробувань та мета досліджень

Об'єктом випробувань обрали високотемпературні ТІМ ZYF-150 та NAB (виробник – ZIRCAR Ceramics, Inc., США). Вони виготовлені у вигляді гнучких високопористих матів з волокон YSZ (ZYF-150) та оксиду алюмінію (NAB) [1, 2]. Паспортні характеристики цих матеріалів наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики високотемпературних ТІМ ZYF-150 та NAB

Характеристика	ZYF-150	NAB
Товщина, мм	3,81	25
Склад волокон, % мас.	ZrO_2 < 89 Y_2O_3 – 10	Al_2O_3 – 95 SiO_2 – 5
Діаметр волокон, мкм	4 – 6	3 – 5
Пористість, %	96	–
Щільність, кг/м^3	240	100
Максимальна температура використання, °С	2000	1800

Мета дослідження – визначити теплопровідність високо-температурних теплоізоляційних матеріалів ZYF-150 та NAB при односторонньому нагріванні до температури поверхні 2000 °С та 1800 °С відповідно, в умовах, близьких до експлуатаційних, а також підтвердити їх паспортні характеристики.

1.2. Методика дослідження

Визначення ТЗКТ матеріалів ZYF-150 та NAB експериментально-розрахунковим шляхом проведено в дві стадії. На першій, в експерименті при односторонньому нагріванні до робочих температур, реєстрували температурні поля у зразку або наборі послідовно розташованих зразків. На другій, розв’язали зворотну задачу теплопровідності за допомогою комп'ютерної моделі та знайшли ТЗКТ.

Зразки теплоізоляційних матеріалів доводили до робочих температур шляхом контакту з нагрівачем. Його роль виконувала підкладка виготовлена з ВВКМ, яку нагрівали факелом зварювального пропан-кисневого пальника на режимі відновного полум'я. Її товщина становила менше ніж 3 мм. У процесі нагрівання реєстрували температуру поверхні підкладки пірометрами з лазерним наведенням № 1 та № 2, а також лінійне винесення з неї так само як при визначенні ТЗКТ ВВКМ [3]. Експериментальне обладнання та методика відповідає викладеній у [3].

1.3. Експериментальні моделі для випробувань теплоізоляційних матеріалів

Випробування ТІМ провели на двох типах експериментальних моделей (рис. 1).

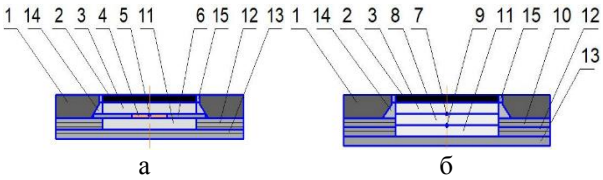


Рис. 1. Схеми експериментальних моделей для випробувань теплоізоляційних матеріалів ZYF-150 та NAB: а – модель типу № 1; б – модель типу № 2: 1 – корпус; 2 – нагрівач; 3 – зразок ТІМ №1; 4 – датчик; 5 – ТЕП датчика; 6 – кільце датчика; 7 – ТЕП зразка №1; 8 – зразок ТІМ №2; 9 – ТЕП зразка №2; 10 – кільце зразка №2; 11 – утеплювач; 12 – кільце теплоізолятора; 13 – теплоізоляційна плита; 14 – ущільнення зразка; 15 – ущільнення нагрівача

У моделі типу № 1 використали мідний датчик (4), що обмежило її максимальну робочу температуру до 1085 °С (температура плавлення міді). На моделях типу №1 випробувані два зразки ТІМ ZYF-150 (температурні поля № 1 та № 2), решта – на моделі типу № 2. Це підвищило максимальну робочу температуру до рівня можливостей термоелектричних перетворювачів (ТЕП) типу К (хромель-алюмелева термопара), короткочасно до 1360 °С, на рис. 1 позиції 5, 9.

Корпус експериментальних моделей обох типів, виконаний із матеріалу ВВКМ, має діаметр 120 мм, зразки із матеріалів ZYF-150 та NAB – 40 мм.

На рис. 2 показані стадії виготовлення експериментальної моделі типу № 1. В обох моделях кільця 6, 10 та 12 та теплоізоляційної плити 13 (товщиною
3 мм) виготовляли з листового азбесту різної товщини, який доводили до необхідного розміру (товщини) та з'єднували силікатним клеєм.

В процесі остаточного складання всі елементи моделей скріплювали клейовим з'єднанням та висушували в сушильній шафі при температурі 80 °С протягом п'яти годин.

Таким же чином виготовили моделі типу № 2. Утеплювач 11 у всіх випадках виготовили з ТІМ ZYF-150. При випробуванні ТІМ NAB у моделі типу № 2 встановлювали один зразок з нього (товщина – 25 мм) в якому ТЕП № 1 розташовували в тонкому розрізі з боку гарячої поверхні на глибині 12,5 мм.

Спай термопари розташували на необхідній глибині, а її кінці розтягували та фіксували по діаметру між шарами кільця зразка. Аналогічно закріплювали спай термопари ТЕП №2 між кільцями зразка та утеплювача.

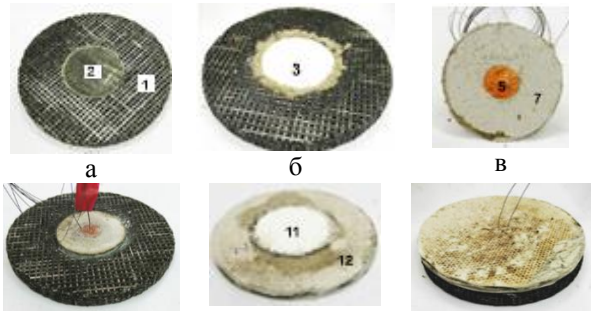


Рис. 2. Стадії виготовлення експериментальної моделі типу № 1: а – установка нагрівача 2 в корпус 1 з ущільнення 15; б – установка зразка 3 корпус 1 з ущільненням 14; в – датчик 5 з ТЕП 6 в кільці 7; г – становлення датчика на зразку; д – утеплювач 11 в обічайці 12; е – модель № 1 у зборі (вид ззаду)

Модель № 1 ZYF-150 (температурне поле № 1) підготовлена до випробування, наведена на рис. 3, а. В центрі зразка видно позначки лазерних покажчиків пірометрів, зведені в одну точку.

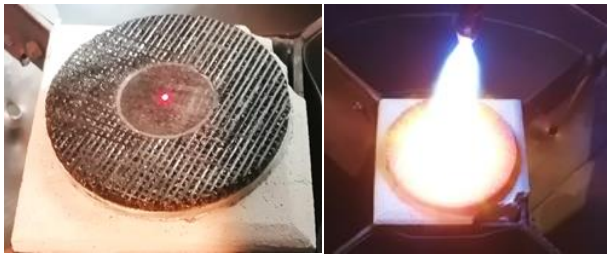


Рис. 3. Зовнішній вигляд експериментальної моделі типу №1: а – перед початком випробування №1; б – у процесі випробування за температури поверхні 1200 °С

За ступенем однорідності нагріву по площі зразка під час випробувань можна спостерігати за рис. 3, б.

Методика проведення експерименту загалом аналогічна методиці проведення термоерозійних випробувань [3] з двома відмінностями:

1) температуру на тильній стороні зразків вимірювали термоелектричними перетворювачами (термопарами типу К, діаметр дроту – 0,2 мм);

2) програму нагріву визначали не з умов термоерозійних випробувань ТІМ, що досліджувалися, а зручністю розрахунку їх ТЗКТ.

1.2. Теплофізичні характеристики матеріалів ZYF-150 та NAB

Необхідні для визначення ТЗКТ значення щільності, товщини отримали з паспортів ТІМ ZYF-150 та NAB (табл. 1). Температурні залежності питомої теплоємності для окремих речовин, що входять до їх складу, наведені на рис. 4.

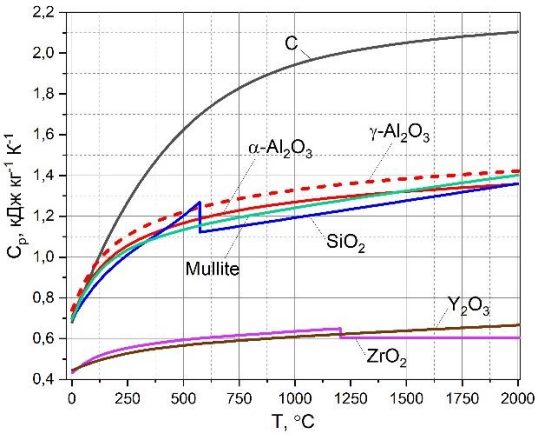


Рис. 4. Температурні залежності питомої теплоємності компонентів теплоізоляційних матеріалів ZYF-150 та NAB у діапазоні температур до 2000 та ВВКМ (вуглець)

Значення питомої теплоємності модифікацій α-Al_2O_3 та γ-Al_2O_3 оксиду алюмінію, діоксиду кремнію SiO_2 та діоксиду цирконію ZrO_2 отримали з бази даних Національного інституту стандартів та технологій США (NIST) [4], оксиду ітрію – з [5], муліту – з [6].

Для оцінки питомої молярної теплоємності ТІМ ZYF-150 застосували правило Реньо та дані для його компонент, рис. 4. Обчислення виконали до температури 1200 °С, яка вважається температурою фазового перетворення ZrO_2 (з моноклінної до тетрагональної форми решітки). До отриманої залежності додали паспортні значення (їм надали статистичної ваги) [1] та апроксимували утворений набір, рис. 5.

Розрахунок теплопровідності матеріалу ZYF-150 виконали з використанням отриманої апроксимації питомої теплоємності з рис. 5.

Виробник у паспорті до матеріла NAB вказує діапазон зміни окремих його компонентів у відсотках: (30…50) % (мас.) α-Al_2O_3 – (34…54,2) % γ-Al_2O_3 – (0…3,3) % SiO_2 – (5…16) % (муліт). Оскільки муліт має змінний склад у діапазоні від ($3Al_2O_3 \times 2SiO_2$) до ($2Al_2O_3 \times 3SiO_2$) для розрахунків прийняли змінний масовий склад у діапазоні (53…72) % (мас.) Al_2O_3 – (28…47) % (мас.)SiO_2.

Розраховані температурні залежності питомої теплоємності для семи варіантів складу за правилом Реньо, що відповідають наведеним паспортним даним матеріалу NAB в діапазоні температур до 2000 °С. Їх СКВ від середнього значення склало менше ніж

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

1 %. Тому їх усередненні значення прийняли за шукану теплоємність матеріалу NAB. Прийняті для подальших розрахунків температурні залежності питомих теплоємностей матеріалів ZF-150 та NAB наведені на рис. 6.

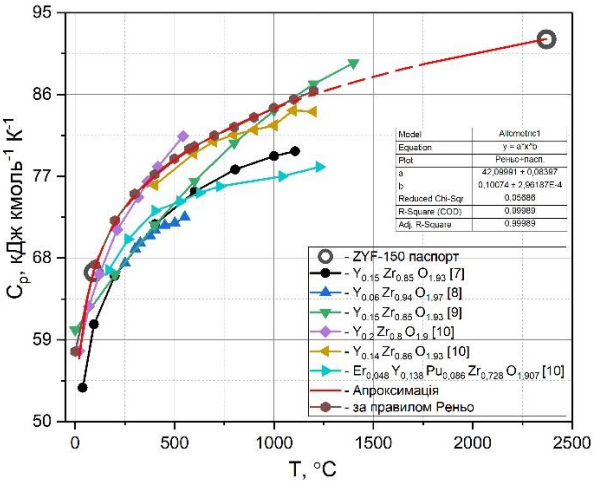


Рис. 5. Результат розрахунку за правилом Реньо температурної залежності питомої молярної теплоємності матеріалу ZYF-150 та її апроксимація разом з паспортними значеннями до температури 2371 °C, а також питомої теплоємності його аналогів [7-10]

Питома теплоємність пірографіту (вуглецю) отримана нами шляхом апроксимації наявного масиву даних про неї для вуглець-вуглецевих та інших композиційних матеріалів на основі графіту [11].

У паспортах обох матеріалів наведено їх температурні залежності коефіцієнта теплопровідності, які підлягають перевірці. Апроксимацію та екстраполяцію до 2000 °C цих ТЗКТ поліномами другого порядку, наведено на рис. 7.

Легко бачити, що паспортні значення ТЗКТ обох матеріалів майже на 100% описуються поліномами другого порядку (рис. 7).

1.3. Комп'ютерна модель визначення температурної залежності коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів

Основою комп’ютерної моделі для визначення ТЗКТ ТІМ є одновимірна модель, яку застосовували для визначення ТЗКТ ВВКМ [3]. До неї додали компоненти, які відповідають шарам пакетів експериментальних моделей: для моделі типу №1 – два шари ТІМ ZYF-150, шар мідного датчика, розташований між ними, та шар азбестової теплоізоляційної плити; для моделі типу №2 – два шари ТІМ, що досліджували, шар утеплювача з ТІМ ZYF-150 та шар теплоізоляційної плити. У обох випадках, з урахуванням шару обігрівача з ВВКМ, модель включає п’ять шарів-компонентів.

Для розрахунку використали наступні теплофізичні характеристики матеріалів шарів (щільність, температурні залежності питомої теплоємності та коефіцієнта теплопровідності): ВВКМ (нагрівач) – ТФХ [11] та азбестовий картон (теплоізоляційна плита) з вбудованої бібліотеки COMSOL Multiphysics®, ТІМ ZYF-150 та NAB – паспортні значення щільності, значення питомих теплоємностей, рис. 5, 6.

Розрахункові координати температур відповідали положенням термопар в експериментальних моделях. Обчислення виконували до збігу розрахункової кривої з експериментальною з середнім квадратичним відхиленням менше ніж 10 °C та максимальним відхиленням не більше 20 °C.

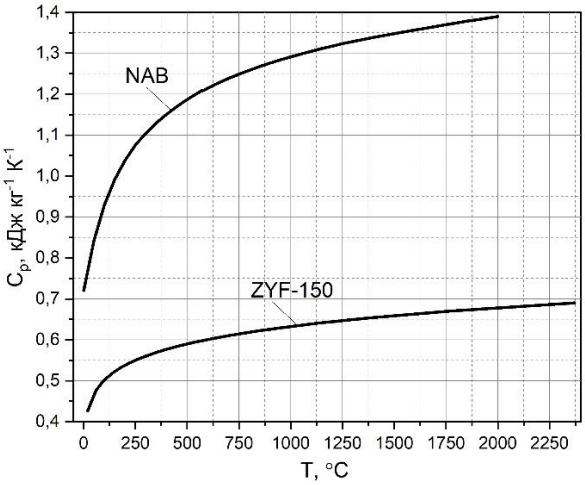


Рис. 6. Отримані залежності питомої теплоємності теплоізоляційних матеріалів ZYF-150 та NAB від температури

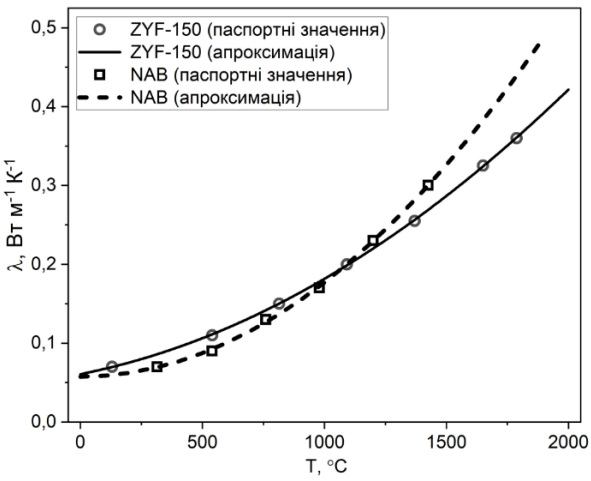


Рис. 7. Температурні залежності коефіцієнта теплопровідності матеріалів ZYF-150 та NAB – паспортні значення та результати їх апроксимації та екстраполяції поліномами другого порядку

Граничну умову на поверхні нагрівача, яку нагрівали, залишили таку саму – залежність її температури від часу (гранична умова першого роду).

Як граничну умову на холодній стороні моделі (зовнішньої поверхні теплоізоляційної плити) прийняли сталість температури на рівні температури навколишнього середовища (також умова першого роду).

Моделюванням визначили, що для цього товщина теплоізоляційної плити має бути h_{asb} >= 10 мм. За такої товщини виконується умова теплоперенесення у напівнескінчену стінку, що цілком відповідає екперементальним умовам. Тому всі розрахунки виконані при заданому в моделі значенні h_{asb} = 10 мм.

1.4. Результати розрахункового визначення температурної залежності коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів ZYF-150 та NAB до 2000 °С

1.4.1. Результати визначення температурної залежності коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційного матеріалу ZYF-150

Закладені у розрахунок ТЗКТ на комп'ютерній моделі прийняті характеристики температурних полів зразків ТІМ ZYF-150 (поля № 1 – № 4) та NAB (№ 5), наведені у табл. 2.

Статистичні характеристики абсолютних та відносних відхилень значень індивідуальних ТЗКТ λ_N(T), які отримали за чотирма експериментальними температурними полями зразків ТИМ ZYF-150, а також його паспортної ТЗКТ $\lambda_{ZYFpasp}$ (T) від значень їх усередненої ТЗКТ λ_{ZYF} (T), наведені у табл. 3, рис. 9.

Таблиця 2

Характеристики температурних полів зразків теплоізоляційних матеріалів ZYF-150 (поля № 1 – № 4) та NAB (№ 5)

Характеристика	Номер температурного поля				
	№1	№2	№3	№4	№5
Матеріал	ZYF-150				NAB
Висота зразка, мм	3,8	3,8	3,8 (2 шт.)	3,8 (2 шт.)	25
График темпер. поля, рис. №	6	7	8	9	10
Час розрах. ділянки темпер. поля, с	420	164	140	531	490
Початкова висота нагрівача мм	2,75	2,65	1,02	2,43	1,7
Лінійне винесення нагрівача, мм	0,1	2,65	0,9	2,43	1,7

Порівняння експериментальних та розрахункових температурних полів, що отримали у чотирьох випробуваннях зразків ТІМ ZYF-150. Для прикладу, наведено температурне поле №4 на рис. 8.

1.4.2. Результати визначення температурної залежності коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційного матеріалу NAB

Для визначення ТЗКТ теплоізоляційного матеріалу NAB використали температурне поле № 5 (рис. 10). Слід зазначити, що це поле отримали з найбільшою точністю, оскільки воно записане авторами після проведення всіх попередніх експериментів і, відповідно, з урахуванням накопиченого досвіду

Таблиця 3

Статистичні характеристики абсолютних та відносних відхилень значень індивідуальних ТЗКТ λ_N(T), які отримали за чотирма температурними полями випробувань зразків ТИМ ZYF-150, а також його паспортної ТЗКТ $\lambda_{ZYFpasp}$ (T) від значень їх усередненої ТЗКТ λ_{ZYF} (T)

Статистичні характеристики відхилень λ_N(T) та $\lambda_{ZYFpasp}$ (T) від λ_{ZYF}(T)	Залежності λ_N (T), отримані в випробуваннях зразків ZYF-150				Паспортні значення
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	$\lambda_{ZYFpasp}$
Середнє квадр. відхил., Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$	0,029	0,049	0,022	0,038	0,038
Модуль макс. відхилення, Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$	0,051	0,087	0,045	0,088	0,046
Середнє квадр. Відносне відхилення, %	27,2	24,6	16,9	17,2	38,2
Модуль макс. відносн. відхил., %	57,9	49,4	32,1	36,5	66,0

Особлива увага приділена фіксації спаїв ТЕП у заданих координатах, що дозволило звести до мінімуму похибку експерименту, пов'язану з невизначеністю їх положення. Власна ТЗКТ поля № 5 λ_{NAB5} підібрана таким чином, щоб забезпечити максимально близькі значення середніх квадратичних відхилень розрахованих по ній значень температури в точках установки термопар від записаних ними експериментальних значень (табл. 4).

У діапазоні паспортних значень ТЗКТ ТІМ NAB $\lambda_{NABpasp}$(T) середнє квадратичне відхилення (СКВ) їх абсолютних значень від отриманих експериментальних $\lambda_{NABpasp}$(T) становить 0,019 Вт/(м К), максимальне – 0,041 Вт/(м К), а відносне СКВ та максимальне відносне відхилення – 13,5 % та 20,3 %, відповідно.

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

Таблиця 4

Статистичні характеристики абсолютних та відносних відхилень розрахункових значень температури в точках установки термопар $T_{cold\ calc1}$ та $T_{cold\ calc2}$, отриманих за температурними залежностями $\lambda_{NAB\ 5}$ та $\lambda_{NABpasp}$, від експериментальних значень $T_{cold\ exp1}$ та $T_{cold\ exp2}$

Статична характеристика	Температурна залежність			
	λ_{NAB5}		$\lambda_{NABpasp}$	
	ТЭП1	ТЭП2	ТЭП1	ТЭП2
Середнє квадратичне абсолютне, °С	11,9	10,0	35,6	11,0
Модуль максимальне абсолютне, °С	27,1	16,9	49,9	23,2
Середнє квадратичне відносне, %	4,4	12,8	9,4	18,6
Модуль максимальне відносне, %	18,2	48,1	37,0	60,8

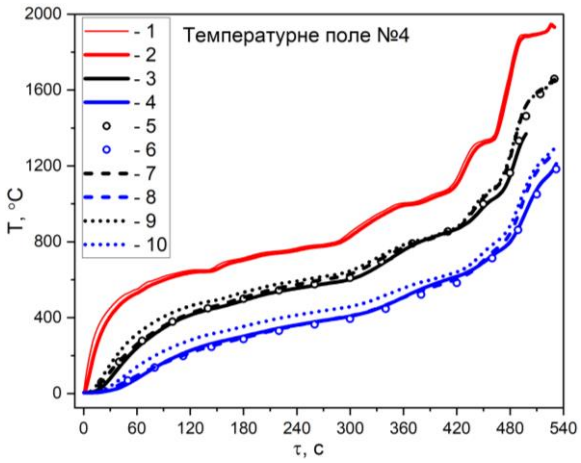
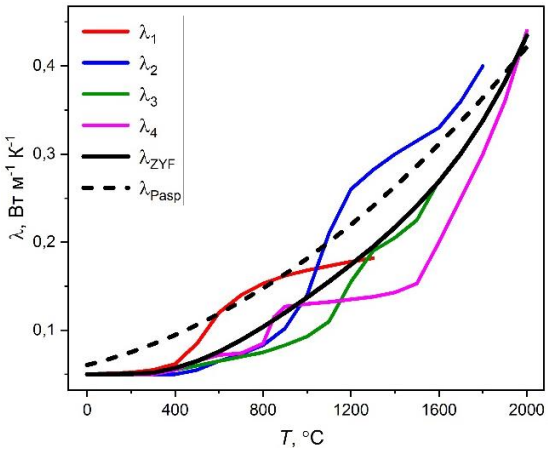
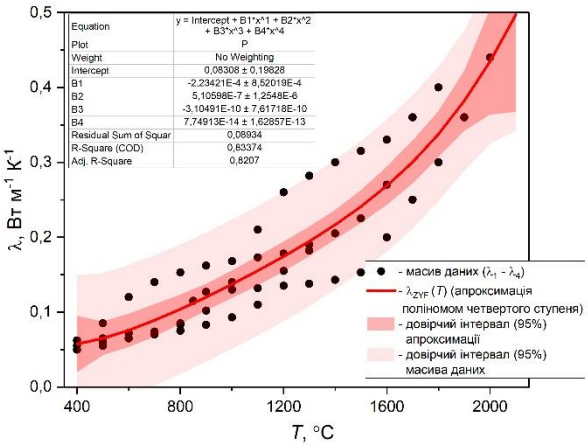


Рис. 8. Експериментальне температурне поле № 4 з розрахунковими полями, що отримали з використанням ТЗКТ λ_4, λ_{ZYF} та $\lambda_{ZYFpasp}$: 1 – експериментальна температура зовнішньої поверхні нагрівача $T_{hot\ exp\ BKKM}$; 2 – розрах. температура межі нагрівача зі зразком № 1 ТІМ ZYF-150 $T_{hot\ calc1}$; 3 – експериментальна температура межі між зразками № 1 та № 2 ТІМ $T_{cold\ exp1}$; 4 – експериментальна температура межі між зразком № 2 та ізолятором $T_{cold\ exp2}$; 5 – температура межі між зразками № 1 та № 2 $T_{cold\ calc1}$, розрах. за λ_4; 6 – температура межі між зразком № 2 та ізолятором $T_{cold\ calc2}$, розрах. за λ_4; 7 – температура межі між зразками № 1 та № 2 $T_{cold\ calc1\ ZYF}$, розрах. за λ_{ZYF}; 8 – температура межі між зразком № 2 та ізолятором $T_{cold\ calc2\ ZYF}$, розрах. за λ_{ZYF}; 9 – температура межі між зразками № 1 та № 2 $T_{cold\ calc1\ Pasp}$, розрах. за $\lambda_{ZYFpasp}$; 10 – температура межі між зразком № 2 та ізолятором $T_{cold\ calc2\ Pasp}$, розрах. за $\lambda_{ZYFpasp}$



а



б

Рис. 9. Температурні залежності коефіцієнта тепло-провідності зразків ТІМ ZYF-150, які розраховані за λ_1, λ_2, λ_3, λ_4 (а); узагальнююча залежність λ_{ZYF}, яка отримана апроксимацією поліномом четвертого ступеня масиву значень, що отримані за λ_1- λ_4, та паспортна залежність λ_{ZYF} (б)

Середнє квадратичне відхилення температур, що розрахували за ТЗКТ λ_{NAB5}, від їх експериментальних значень по першій термопарі становило 12 °С, а по другій – 10 °С. Розрахунок за паспортною ТЗКТ $\lambda_{NABpasp}$ показав СКВ – 36 °С та 11 °С. Це свідчить про високу точність опису нею температурного поля № 5. Як і у випадку з ТІМ ZYF-150, паспортна ТЗКТ матеріалу NAB дещо завищує зумовлені температури, але значно меншою мірою.

1.5. Аналіз результатів випробувань

Особливістю волокнистих теплоізоляційних матеріалів ZYF-150 та NAB є їх висока пористість: паспортне значення пористості ТІМ ZYF-150 – 96 %, пористість ТІМ NAB в паспорті не вказано, але, судячи з густини (100 кг/м^3), її значення більше ніж 97 % (рис. 10). У роботі [12] вказується, що в такого роду матеріалах реалізуються всі три наявні механі-

зму теплоперенесення: контактно-кондуктивне теплоперенесення у твердій фазі (в волокнах каркаса), кондуктивне, конвективне і радіаційне теплоперенесення у газовій фазі (в порах). Внесок кожного з них у сумарне теплоперенесення визначається насамперед пористістю матеріалу та його фізичною структурою (формою каркаса й переважною орієнтацією волокон у ньому), а також залежить від хімічного складу, рівня та градієнта температури у матеріалі, складу та тиску газової фази. Настільки складний комбінований механізм теплоперенесення у високопористих волокнистих теплоізоляційних матеріалах визначає ефективний характер коефіцієнтів їхньої теплопровідності, тобто їхню залежність не тільки від складу, структури й температури, а й від умов нагріву (головним чином – темпу нагріву), складу навколишнього газового середовища та його тиску. Відсутність у таких матеріалів фіксованих форми та об'єму, а також пов'язана з цим неоднорідність їхньої щільності істотно ускладнюють експериментальне визначення коефіцієнтів теплопровідності, спричиняючи значний розкид їхніх значень (на десятки відсотків).

Аналіз паспортних температурних залежностей коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів ZYF-150 та NAB показав, що вони з абсолютною точністю описуються найпростішими поліномами другого ступеня (рис. 7), що, швидше за все, є результатом апроксимації первинних експериментальних даних, при якій перевагу віддали простоті залежності на шкоду її точності. Однак, ТЗКТ $\lambda_{ZYFpasp}$ непогано описує температурні поля №№ 1 – 4, як видно з рис. 9.

У роботі [12] стаціонарним методом (з встановленим тепловим потоком) в діапазоні 277 – 1552 °С визначена ТЗКТ теплоізоляційного матеріалу (схожого на NAB), виготовленого з волокон на основі оксиду алюмінію з додаванням діоксиду кремнію та густиною 120 кг/м^3. Експериментальні значення ТЗКТ цього матеріалу, результат їх апроксимації поліномом четвертого ступеня, її статистичні характеристики, а також результат екстраполяції отриманої залежності в діапазонах 0 °С – 277 °С та 1552 °С – 1800 °С, наведений на рис 11. Отримана ТЗКТ $\lambda_{[12]}$ у порівнянні з $\lambda_{NAB\ 5}(T)$ та $\lambda_{NABpasp}(T)$, наведена на рис. 12.

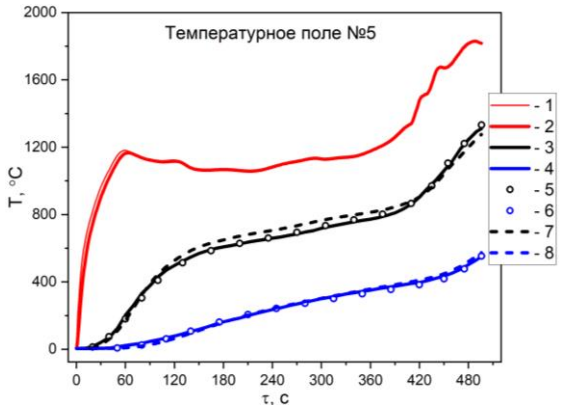


Рис. 10. Експериментальне температурне поле № 5 з розрахунковими полями, що отримали з використанням ТЗКТ λ_{NAB5} и $\lambda_{NABpasp}$:
1 – експериментальна температура зовнішньої поверхні нагрівача $T_{hot\ exp\ ВККМ}$; 2 – розрахункова температура межі нагрівача зі зразком № 1 ТІМ NAB $T_{hot\ calc1}$; 3 – експериментальна температура у точці розміщення ТЕП № 1 $T_{cold\ exp1}$;
4 – експериментальна температура кордону між зразком та ізолятором $T_{cold\ exp2}$;
5 – температура в точці розміщення ТЕП № 1 $T_{cold\ calc1}$, розрахунок за λ_{NAB5};
6 – температура кордону між зразком та ізолятором $T_{cold\ calc2}$, розрахунок за λ_{NAB5};
7 – температура в точці розміщення ТЕП № 1 $T_{cold\ calc1\ Pasp}$, розрахунок за $\lambda_{NABpasp}$;
8 – температура кордону між зразком та ізолятором $T_{cold\ calc2\ Pasp}$, розрахунок по $\lambda_{NABpasp}$

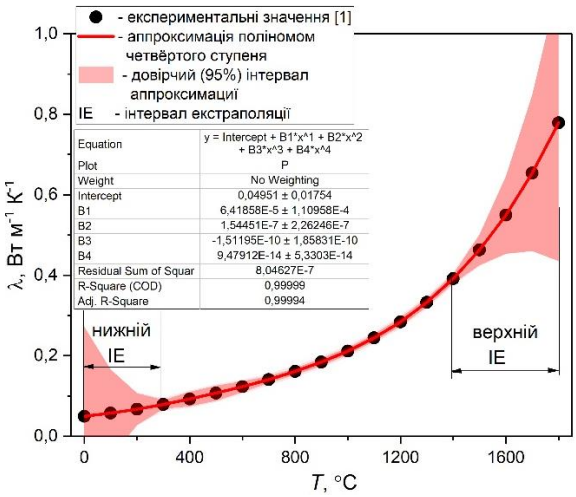


Рис. 11. Експериментальні значення ТЗКТ теплоізоляційного матеріала-аналога NAB [12], результат апроксимації цих значень поліномом четвертого ступеня, статистичні характеристики апроксимації та результат екстраполяції отриманої залежності в діапазонах 0 °С – 277 °С та 1552 °С – 1800 °С

Як видно з рис. 12, всі три залежності добре корелюють між собою, особливо на ділянці до 1400 °С, де визначені паспортні значення ТІМ NAB та представлені експериментальні дані матеріалу-аналогу [12].

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

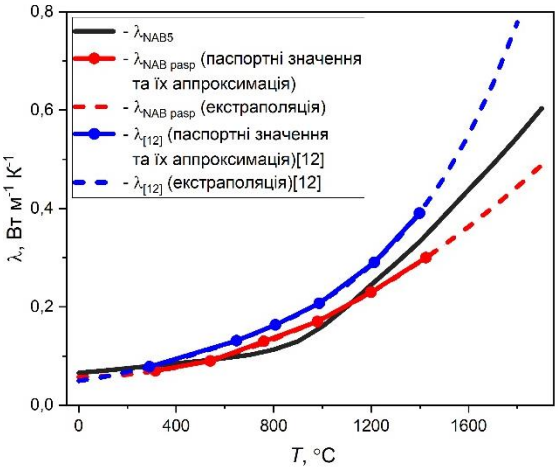


Рис. 12. Отримана за температурним полем № 5 ТЗКТ $\lambda_{NAB\ 5}$, паспортна ТЗКТ $\lambda_{NABpasp}$ теплоізоляційного матеріалу NAB у порівнянні з ТЗКТ матеріалу-аналогу з [12]

Необхідно відзначити, що найбільшу точність розрахунку температури холодної сторони зразка TIM NAB досягнули при використанні ТЗКТ λ_{NAB}, утвореної середніми значеннями залежностей λ_{NAB5}(T) та $\lambda_{NABpasp}$(T): СКВ значення температур 6,4 °C; модуль максимального відхилення – 15,7 °C.

При цьому у двох використаних джерелах (паспорт NAB та робота [12]) відсутні дані про значення коефіцієнта теплопровідності при температурах вище 1425 °C, у третьому (паспорт ZYF-150) вони представлені лише до 1788 °C.

Аналіз ТЗКТ TIM ZYF-150 та NAB підтвердив адекватність розробленої методики й комп'ютерної моделі. Для ZYF-150 середнє СКВ становить 21,5 %, максимальне відхилення – 44 %. Для NAB СКВ – 15,5 %, максимальне відхилення – 23,6 %.

Внесок авторів: Д. В. Боровик – розробка методики та комп'ютерної моделі, проведення розрахунків, аналіз літературних джерел; **Ю. І. Євдокименко** – планування експериментів, розробка моделей, участь в проведенні експериментів з визначення ТЗКТ теплоізоляційних матеріалів, розрахунки результатів; **Г. О. Фролов** – науково керівництво роботою, теоретичне забезпечення методики, аналіз результатів; **О. Д. Колотило –** виготовлення випробувальних моделей та проведення експериментів; **О. М. Потапов** – постановка задачі, аналіз результатів; **Н. І. Суєтова** – підготовка зразків до випробувань теплоізоляційних матеріалів, планування експериментів, участь у проведенні експериментів, аналіз результатів.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Zircar Zirconia ZYF-150 Zirconia Felt Insulation Datasheet [Electronic resource] // Shanghai Songhan Plasticization Technology Co., Ltd. Access mode: https://www.lookpolymers.com/pdf/ – 12.05.2025.*

2. *Alumina Blanket Type NAB & Type NMB [Electronic resource] ZIRCAR Ceramics, Inc. PO Box 519. Available at: https://www.zircarceramics.com/product/nab-type-nmb/ – 12.05.2025.*

3. *Боровик, Д. Визначення теплофізичних характеристик композиційних матеріалів при високих температурах [Text] / Д. Боровик, Ю. Євдокименко, & Г. Фролов // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2024. – № 4sub1. – С. 89-99. doi: 10.32620/aktt.2024.4sup1.13.*

4. *National Institute of Standarts and Technology US Department of Commerce. NIST Chemistry WebBook, SRD 69. [Electronic resource]. doi: 10.18434/T4D303.*

5. *Swamy, V. Thermodynamic properties of Y_2O_3 phases and the yttrium–oxygen phase diagram [Text] / V. Swamy, H.J. Seifert, F. Aldinger // Journal of Alloys and Compounds. – 1998. – Vol. 269, iss. 1-2. – P. 201-207. doi: 10.1016/S0925-8388(98)00245-X.*

6. *Большакова, Н. В. Материалы для электротермических установок. Справочное пособие [Текст] / Н. В. Большакова, К. С. Борисанова, В. И. Бурцев и др. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.*

7. *Thermo-Physical Properties of Ni-YSZ as a Function of Temperature and Porosity [Text] / M. Radovic, E. Lara-Curzio, R. Trejo, H. Wang, & W. D. Porter // Ceramic Engineering and Science Proceedings. – Vol. 27, Iss. 4. – 2006. – P. 79-85. doi: 10.1002/9780470291337.ch8.*

8. *Measurements of IR Spectra and Thermophysical Properties of Tetragonal Zirconia by Thermal Radi-*

ation Calorimetry [Text] / H. Tanaka, S. Sawai, K. Morimoto, & K. Hisano // Japanese Journal of Applied Physics. – Vol. 39. – № 11R. – 2000. – P. 6465–6470. doi: 10.1143/JJAP.39.6465.

9. Porous yttria-stabilized zirconia ceramics with ultra-low thermal conductivity. Part II: Temperature dependence of thermophysical properties [Text] / Hu. Liangfa, Wang Chang-An, Hu. Zijun, Lu. Sheng, Sun. Chencheng, & Huang Yong // Journal of Materials Science. – – 2011. – Vol. 46, iss. 3. – P. 623-628. doi: 10.1007/s10853-010-4783-y.

10. Specific heat capacity and Debye temperature of zirconia and its solid solution [Text] / C. Degueldre, P. Tissot, H. Lartigue, M. Pouchon // Thermochimica Acta. –Vol. 403, iss.2. – 2003. – P. 267–273. doi: 10.1016/S0040-6031(03) 00060-1.

11. Визначення теплофізичних характеристик вуглець-вуглецевих матеріалів розрахунково-експериментальним методом [Text] / Д. В. Боровик, Ю. И. Евдокименко, Г. О. Фролов, П. Г. Круковский, & Д. І. Скляренко // Теплофізика та теплоенергетика. – 2024. – Т. 46, №4. – С. 33-41. doi: 10.31472/ttpe.4.2024.4.

12. Падерин, Л. Я. Исследование теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов при высоких температурах [Текст] / Л. Я. Падерин, Б. В. Прусов, & О. Д. Токарев // Учёные записки ЦАГИ. – 2011. – Том XLII. – № 4. – С. 77 – 88.

References

1. *Zircar Zirconia ZYF-150 Zirconia Felt Insulation Datasheet*. Available at: https://www.lookpolymers.com/pdf/ (accessed 12.05.2025).

2. *Alumina Blanket Type NAB & Type NMB*. Available at: https://www.zircarceramics.com/product/nab-type-nmb/ (accessed 12.05.2025).

3. Borovyk, D. V., Evdokimenko, Y. I., Frolov, G. A. Vyznachennya teplofizychnykh kharakterystyk kompozytsiynykh materialiv pry vysokykh temperaturakh [Determination of the thermophysical characteristics of composite materials at high temperatures]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2024, no. 4sub1, pp. 89-99. doi: 10.32620/aktt.2024.4sup1.13. (In Ukrainian).

4. *National Institute of Standarts and Technology US Department of Commerce. NIST Chemistry WebBook, SRD 69*. doi: 10.18434/T4D303.

5. Swamy, V., Seifert H. J., & Aldinger F. Thermodynamic properties of Y_2O_3 phases and the yttrium–oxygen phase diagram. *Journal of Alloys and Compounds (LTWA)*, 1998, vol. 269, iss. 1-2, pp. 201-207. doi: 10.1016/S0925-8388(98)00245-X.

6. Bolshakov, N. V., Borisanova, K. S., Burtsev, V. I., et al. *Materialy dlya elektrotermicheskikh ustanovok. Spravochnoye posobiye* [Materials for electrothermal installations'. Reference manual]. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1987. 296 p. (in Russian).

7. Radovic, M., Lara-Curzio, E., Trejo, R., Wang, H., & Porter, W.D. Thermo-Physical Properties of Ni-YSZ as a Function of Temperature and Porosity. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2006, vol. 27, iss. 4, pp. 79-85. doi: 10.1002/9780470291337.ch8.

8. Tanaka, H., Sawai, S., Morimoto, K., & Kumao Hisano, K. Measurements of IR Spectra and Thermophysical Properties of Tetragonal Zirconia by Thermal Radiation Calorimetry. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 39, iss. 11R, pp. 6465–6470. doi: 10.1143/JJAP.39.6465.

9. Liangfa, Hu., Chang-An Wang, Zijun Hu, Sheng Lu, Chencheng Sun, & Yong Huang. Porous yttria-stabilized zirconia ceramics with ultra-low thermal conductivity'. Part II: Temperature dependence of thermophysical properties. *Journal of Materials Science*, 2011, vol. 46, iss. 3, pp. 623-628. doi: 10.1007/s10853-010-4783-y.

10. Degueldre, C., Tissot, P., Lartigue, H., & Pouchon, M. 'Specific heat capacity and Debye temperature of zirconia and its solid solution. *Thermochimica Acta*, 2003, vol. 403, iss. 2, pp.267-273. doi: 10.1016/S0040-6031(03) 00060-1.

11. Borovik, D. V., Evdokimenko, Yu. I., Frolov, G. O., Krukovsky, P. G., & Sklyarenko, D. I. Vyznachennya teplofizychnykh kharakterystyk vuhlets′-vuhletsevykh materialiv rozrakhunkovo-eksperymental′nym metodom [Determination of the thermophysical characteristics of carbon-carbon materials using by calculation and experimental method]. *Thermophysics and heat power engineering*,2024, vol. 46, iss. 4, pp. 33-41. doi: 10.31472/ttpe.4.2024.4. (In Ukrainian).

12. Paderin, B. V., Prusov, L. Ya., & Tokarev, O. D. Issledovaniye teploprovodnosti poristykh teploizolyatsionnykh materialov pri vysokikh temperaturakh [Study of thermal conductivity of porous heat-insulating materials at high temperatures]. *Scientific Notes of TsAGI*, 2011, vol. XLII, iss. 4, pp. 77-88. Available at: http://www.tsagi.ru/institute/publications/memoirs/archive_annotations/2011/%D0%A3%D0%97-4-2011.pdf. (accessed 12.05.2025). (in Russian).

Надійшла до редакції 11.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

DETERMINATION OF THERMAL-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THERMAL MATERIALS AT HIGH TEMPERATURES

Dmytro Borovik, Yuriy Yevdokymenko, Gennady Frolov, Oleksandr Kolotilo, Alexander Potapov, Nataliya Suetova

This study presents an experimental–numerical method for determining the thermal conductivity and heat capacity of thermal insulation materials (TIM) at elevated temperatures. The derived thermophysical characteristics were compared with the known properties of the analogous materials. Two TIMs ZYF-150 and NAB (manufacturer: ZIRCAR Ceramics, Inc., USA), were investigated in this study. Both materials exhibit a fibrous, highly porous structure reminiscent of felt, allowing them to easily conform to a given volume and shape. In ZYF-150, the fibers are composed of zirconium dioxide (ZrO_2) stabilized with yttrium oxide (Y_2 O_3), whereas NAB consists of aluminum oxide (Al_2 O_3) fibers containing silicon dioxide (SiO_2) impurities.

In the experiments, the samples were heated using a propane–oxygen torch operating in a reducing flame mode, with the use of a carbon–carbon composite interlayer. This prevented any direct mechanical impact of the flame on the sample surface while ensuring efficient conductive heat transfer. Finite element simulations of the heating process were performed using COMSOL Multiphysics®. The experimentally obtained surface temperature measurements were applied as boundary conditions to solve the inverse heat conduction problem. Consequently, the temperature dependencies of the thermal conductivity coefficients for the ZYF-150 and NAB materials were established. For the NAB material (λ_{NAB5}), the root-mean-square deviation was 15.5% with a maximum relative error of 23.6%, whereas these values were 21.5% and 44% for ZYF-150.

The comparative analysis of the thermophysical properties of the investigated materials with those of similar materials confirms the validity of the developed methodology. The obtained results are expected to be useful for material scientists working on thermal protection materials and for the design of thermal protection systems based on them.

Keywords: thermal protection material; heat capacity; thermal conductivity; modeling; linear wear; gas burner; pyrometer; CCCM.

Боровик Дмитро Валерійович – наук. співроб. Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францовича НАН України, Київ, Україна.

Євдокименко Юрій Ігорович – наук. співроб. Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна.

Фролов Геннадій Олександрович – д-р техн. наук, зав. лаб. від. 49 Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна.

Колотило Олександр Данилович – наук. співроб. Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францовича НАН України, Київ, Україна.

Потапов Олександр Михайлович – керівник комплексу нових матеріалів та перспективних технологій ДП «КБ "Південне"», Дніпро, Україна.

Суетова Наталія Іванівна – провідний інженер ДП «КБ "Південне"», Дніпро , Україна.

Dmytro Borovyk – Researcher at the Institute for Problems of Materials Science named after. I.N. Frantsevich NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: dmitryb2007@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4668-3778.

Yuriy Evdokimenko – Researcher at the Institute for Problems of Materials Science named after. I.N. Frantsevich NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: yevd@meta.ua, ORCID: 0000-0002-3344-798X.

Gennady Frolov – Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of the Institute of Materials Science Problems named after. I.N. Frantsevich NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: g_frolov@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7045-310X.

Oleksandr Kolotylo – Researcher at the Institute for Problems of Material Science named after. I. N. Frantsevich NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: alexkolotilo58@gmail.com, ORCID: 0009-0007-2363-6553.

Alexander Potapov – Head of the New Materials and Advanced Technologies Complex, State Enterprise “Yuzhnoye State Design Office”, Dnipro, Ukraine,
e-mail: dnsk007@gmail.com, ORCID: 0009-0004-1088-3748.

Nataliya Suetova – Leading Engineer of the “Yuzhnoye State Design Office”, Dnipro, Ukraine,
e-mail: n7245890@gmail.com, ORCID: 0009-0002-8419-8634.