

УДК 666.3-16

КЕРАМІКА НА ОСНОВІ РЕАКЦІЙНО-ЗВ'ЯЗАНОГО КАРБІДУ БОРУ ДЛЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ КОСМІЧНИХ ЛІТАКІВ

I. O. ГУСАРОВА¹, Є. В. СОЛОДКИЙ², Т. А. МАНЬКО³, П. І. ЛОБОДА²

¹ Державне підприємство "Конструкторське бюро "Південне", Дніпро;

² Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського";

³ Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Розроблено метод активованого спікання реакційно-зв'язаного карбіду бору за дифузійного легування частинок порошку аморфним бором. За активованого спікання в присутності бору та кремнію з допомогою рентгенофазового аналізу показано утворення потрібної фази $B_{12}(B,C,Si)_3$. За результатами мікроструктурних досліджень матеріалу доведено, що на поверхні полікристалів формується дифузійний шар, насичений бором і кремнієм, який оточує кожен частинку. Встановлено, що структура кераміки на основі карбіду бору, отримана в результаті легування бором та кремнієм, це зерна карбіду бору, пронизані голчастими кристалами вторинного карбіду кремнію. Експериментально доведено, що така структура призводить до підвищення в'язкості руйнування матеріалу в 2–3 рази порівняно зі спеченим реакційно-зв'язаним карбідом бору. Це дає можливість застосовувати матеріал для створення теплозахисних покриттів гіперзвукових космічних літаків.

Ключові слова: активоване реакційне спікання, карбід бору, карбід кремнію, теплозахист.

The method for activated sintering of reaction-bonded boron carbide by diffusion doping of boron carbide powder particles with amorphous boron was developed. On the basis of X-ray phase analysis it is shown that under the conditions of activated sintering in the presence of boron the formation of the $B_{12}(B,C,Si)_3$ phase occurred. According to the results of microstructural studies of the material, it is proved that on the surface of polycrystals there is a diffusion layer saturated with boron and silicon, which surrounds each particle. It is found that the structure of obtained ceramics based on boron carbide by doping with boron and silicon, represents the boron carbide grains penetrated by needle crystals of secondary silicon carbide. It has been experimentally proved that this nature of the structure leads to an increase in the fracture toughness of the material in 2–3 times compared to the existing sintered reaction-bonded boron carbide. This allows us to use the material for creating heat-proof coatings for hypersonic spacecraft.

Keywords: activated reaction sintering, boron carbide, silicon carbide, heat protection.

Вступ. Кераміка на основі карбіду бору характеризується високою міцністю за високих температур, хімічною інертністю, малою питомою вагою [1]. Головним недоліком цього класу матеріалів, який обмежує застосування в умовах циклічної зміни температур, є крихкість. Раніше показано, що армовані композиційні керамічні матеріали на основі реакційно-зв'язаного карбіду бору мають значний потенціал для вирішення цієї проблеми [2].

Інтенсивно вивчали реакційне спікання карбіду бору з кінця 90-х років ХХ ст. [3]. За цього процесу загальні стадії утворення кераміки такі: змішування визначених фракцій вихідних карбідів з вуглецевими компонентами і зв'язувальним,

формування, сушіння-полімеризація і реакційне спікання – просочення заготовок парами та/чи розплавом кремнію [4]. Карбіди $B_{12}(B,C,Si)_3$ утворюються навколо вихідних зерен карбіду бору з формуванням структур типу “ядро-оболонка”. Кінцева структура реакційно-зв’язаного карбіду бору має чотири фази: B_4C , $B_{12}(B,C,Si)_3$, SiC і кремній, в яких розчинено бор і вуглець. Співвідношення і форми складників можна регулювати вихідним складом і режимом процесу [5].

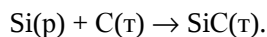
На сьогодні матеріал використовують для отримання ефективніших засобів захисту від зовнішніх механічних впливів. Основні характеристики – високі твердість, модуль пружності і міцність. Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, який характеризує в’язкість руйнування, $2,1...4,50 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ [3]. Підвищення цього параметра дасть змогу розширити межі застосування матеріалу. Одним із ефективних способів підвищення тріщиностійкості є створення композиційних матеріалів як на мікро-, так і макрорівні (шаруваті структури) [6], а також армування керамічними волокнами [7].

Отже, мета роботи – розробити керамічні композиційні матеріали на основі реакційно-зв’язаного карбіду бору, які матимуть критичний коефіцієнт інтенсивності напружень не менш $10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ і зберігатимуть роботоздатність за термоциклування в широкому діапазоні температур.

Метод досліджень. Як вихідні сировинні матеріали використали порошки карбіду бору (95 wt% B_4C , 3 C, 0,8 Fe, 0,5 Si, 0,7 B_2O_3 , JSC Запоріжбразив, Україна), кремнію (99,0%) та бору (99,5%, ХімРеактивКо. Лтд, Україна).

Для встановлення оптимального типу вуглецевого складника визначили повноту утворення карбіду кремнію за взаємодії вуглецю з кремнієм. Для цього з порошків електродного графіту (ЕГ-25), нафтового коксу (КНПЕ) і деревного вугілля, подрібнених до фракції $< 63 \mu\text{m}$, а також з лампової сажі спресували зразки з однаковою пористістю (уявна густина $\sim 1000 \text{ kg/m}^3$).

Експериментально встановлено, що найвищий вміст SiC в результаті взаємодії з розплавленим кремнієм дає нафтовий кокс, який обрали для подальших досліджень:



Графіт завдяки найвпорядкованішій структурі має найменшу реакційну здатність. Сажа, незважаючи на високу хімічну активність, дає невисокий вихід SiC внаслідок агрегування частинок, що призводить до великого вмісту залишкового вуглецю у вигляді великих включень, покритих екранувальним шаром SiC .

Таким чином, обраний склад порошкової суміші такий (wt%): 65 B_4C , 3 B, 25 Si, 7 C (нафтовий кокс). Оскільки карбід бору і нафтовий кокс непластичні, для пресування шихти додавали технологічну бакелітову зв’язку, яка знижує тертя між частинками порошку і полегшує його ущільнення. Крім того, вона забезпечує задовільну міцність спресованої заготовки, що дає можливість її транспортувати. Ба більше, у результаті подальшого нагрівання до температури спікання бакеліт розкладається з виділенням активного вуглецю, який утворить вторинний SiC . Сушили карбідоборні заготовки на бакелітовій зв’язці за двостадійним режимом з двома ізотермічними витримками. Перша ($80...110^\circ\text{C}$) забезпечує видалення основної маси летких елементів (пару розчинника). За другої витримки ($180...190^\circ\text{C}$) відбувається поліконденсація фенолформальдегідної смоли (бакеліту), яка супроводжується додатковим видаленням летких сполук і зміцненням зв’язки. Реакційне спікання виконували за температури 2200°C з витримкою за максимальної температури упродовж 120 min у середовищі проточного аргону у печі Таммана. В умовах реакційного спікання є надлишок кремнію в рідкій і газовій фазах. Видалення вільного кремнію здійснювали при $1950...2000^\circ\text{C}$ упродовж 2,5 h.

Спикання можна прискорити, якщо одночасно відбуватиметься дифузійне легування частинок порошку [8]. Розроблено метод активованого спикання карбіду бору (для активації й прискорення процесу використали бор). Розчинення бору в карбіді бору призводить до утворення твердого розчину заміщення, в якому суттєво зростає кількість дефектів ґратки, що полегшує дифузію вуглецю та утворення вторинного карбіду бору і карбіду кремнію.

Досліджували мікроструктуру за допомогою сканувального електронного мікроскопа Selmi REM-106I (Україна) з EDX аналізатором.

Рентгенофазовий аналіз (РФА) виконували за допомогою дифрактометра Rigaku Ultima IV (Японія) (CuK_α -випромінювання ($\lambda = 1,54187 \text{ \AA}$)) в діапазоні 2θ $10\ldots 90^\circ$, з кроком $0,04^\circ$ та тривалістю витримки 3 с у кожній точці. Для аналізу спектрів застосували метод Рітвельда і програмне забезпечення PDXL. Фазовий склад отриманої кераміки такий (wt%): 67 B_4C ; 21 SiC ; 12 Si .

Міцність вимірювали за триточкового вигину за допомогою універсальної машини 1958 У-10-1 з відстанню між опорами 15 mm і максимальним навантаженням 500 N. Експериментували на повітрі за кімнатної температури зі швидкістю навантаження $0,5 \text{ mm/min}$ і з попереднім навантаженням 2 N. Щонайменше сім зразків ($2 \times 2,5 \times 20 \text{ mm}$) випробовували для кожного композита. Міцність на вигин σ_u визначали за допомогою рівняння

$$\sigma_u = 3Pl / 2bh^2, \quad (1)$$

де P – осьове навантаження; l – відстань між опорами; b , h – ширина і товщина зразка, відповідно.

Твердість за Віккерсом визначали за допомогою мікротвердоміра MНV1000 (Китай) за навантаження 9,8 N, прикладеному впродовж 15 s, згідно зі стандартною методикою (ASTM C 1327-15). Тріщиностійкість визначали за навантаження 49 N з використанням рівняння $K_{IC} = 0,0016(E/HV)^{1/2}(P/cl^{3/2})$ [5], де E – модуль Юнга (GPa); HV – твердість за Віккерсом (GPa); P – навантаження (N), а cl – половина середньої довжини тріщини в mm. Твердість і тріщиностійкість в середньому вимірювали по 20 разів для кожного зразка.

Для встановлення теплофізичних характеристик спочатку визначали теплоємність, використовуючи два методи: у діапазоні температур $40\ldots 440^\circ\text{C}$ за допомогою приладу IT-c-400 (її максимальне значення сягало $\sim 1500 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$), а до температури 1400°C розрахунком, застосовуючи правило Реньо і теплоємність компонентів матеріалу [9]. Експериментально-розрахункове визначення температурної залежності коефіцієнта теплопровідності конструкційної кераміки методом розв'язання оберненої задачі теплопровідності здійснювали за температурними полями, використовуючи результати пірометрів з лазерним наведенням і відомі коефіцієнти випромінювання.

Визначали жаростійкість в окиснювальному середовищі факела зварювального пальника за температури 1400°C і оцінювали за зміною маси зразка. Під час випробувань температура поверхні зразка становила $1400 \pm 10^\circ\text{C}$.

Випробовували для визначення термостійкості в надзвуковому потоці продуктів згоряння за температури 1400°C на термоструменевому обладнанні [10] два зразки за шести циклів нагрівання по п'ять хвилин кожен. Між циклами їх охолоджували до кімнатної температури і візуально оглядали поверхні.

Для вимірювань температури поверхні зразків застосовували два пірометри з лазерним наведенням: INFRATHERM Converter IGA 100 (IMPAC Electronic GmbH, Німеччина) і IMPAC ISQ 5-LO MB-30 (Luma Sense Technologies, США). Температуру на тильній поверхні зразка і давачів теплового потоку одночасно вимірювали термопарами типу К (хромель-алюмель), покази яких реєстрували на комп'ютері за допомогою аналогового перетворювача АКОН-Т [11].

Результати та обговорення. Досліджували мікроструктуру зразків матеріалу $B_4C-SiC-Si$, отриманого активованим та звичайним реакційним спіканням (рис. 1). Виявлено утворення полікристалів реакційно-зв'язаного карбіду бору (темна фаза) і вільний кремній (світло-сіра). Останній знаходиться в міжкристалічному просторі, а також його включення присутні в полікристалах реакційно-зв'язаного карбіду бору. За результатами мікроструктурного аналізу встановлено, що за активованого спікання зменшується вміст вільного кремнію. У матеріалі є окремі пори розміром $2...10\text{ }\mu\text{m}$, які мають сферичну форму. В реакційно-зв'язаному карбіді бору пори відсутні, що пов'язано з виходом всіх газів з матеріалу під час відгонки вільного кремнію.

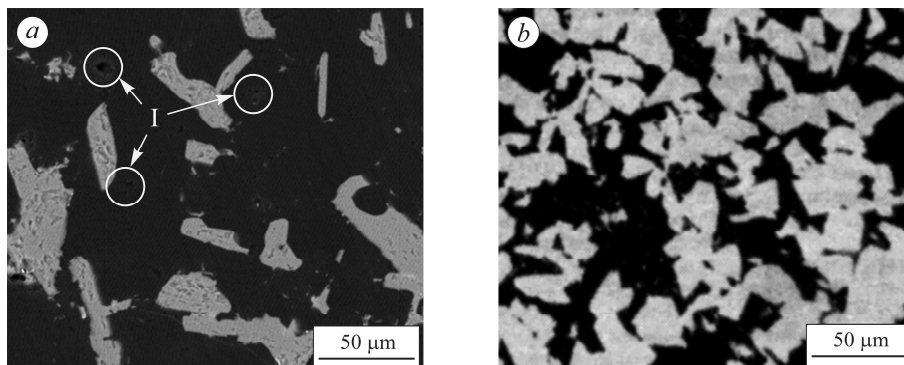


Рис. 1. Мікроструктура карбіду бору, отриманого активованим спіканням за присутності бору (а) та звичайним реакційним спіканням (b): темна фаза – реакційно-зв'язаний карбід бору; світла – кремній; I – пори.

Fig. 1. Microstructure of the boron carbide samples prepared by the activated reaction sintering (a) and reaction sintering (b): dark phase – reaction-bonded boron carbide; light – silicon; I – pores.

За результатами мікроструктурного і мікрорентгеноспектрального аналізів зразків після електролітичного травлення в розчині $NaOH$ встановлено присутність витягнутих кристалів SiC завдовжки до $2000\text{ }\mu\text{m}$ зі середнім співвідношенням довжини до діаметра $50:1$ (рис. 2). У площину шліфа потрапляють кристали як в поздовжньому, так і в поперечному перерізі, що свідчить про те, що кристали мають форму витягнутого стрижня, а не пластини типу мартенситної “голки”. Таким чином, полікристали реакційно-зв'язаного карбіду бору є композиційним матеріалом, який має зерна карбіду бору, армовані витягнутими кристалами SiC . При цьому різко збільшується площа контактних ділянок. Спікання без активувальних додатків призводить лише до незначного зрощення зерен (рис. 1b).

Утворення дифузійного шару, насиченого бором і кремнієм, спостерігали на електронному мікроскопі (рис. 3).

Згідно з результатами досліджень, показано, що на поверхні полікристалів є прошарок, який відрізняється емісійною здатністю і інтенсивністю почорніння від зв'язаного карбіду бору. Помітно, що дифузійний шар є навколо кожної частинки (відмічене овалами, рис. 3). Товщина цього шару за тривалості насичення 120 min і температури 2200°C становить $5...8\text{ }\mu\text{m}$.

Під час реакційного спікання відбуваються складні реакції взаємодії частинок B_4C і вуглецю з розплавом Si :



На основі результатів РФА встановлено, що в умовах активованого спікання в присутності бору та кремнію утворюються фази $B_{13}C_2$ (рис. 4), що свідчить про насичення карбіду бору бором



та зниження вмісту вуглецю внаслідок реакції карбіду бору з кремнієм:

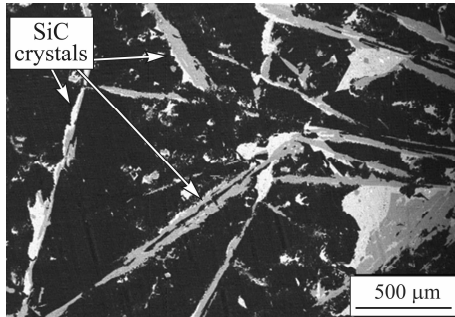
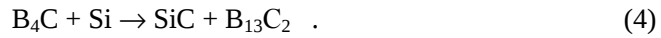


Рис. 2. Fig. 2.

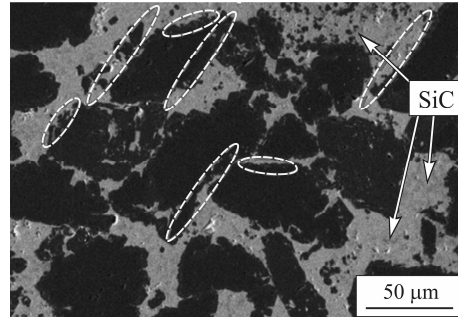


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 2. Витягнуті кристали SiC у мікроструктурі реакційно-зв'язаного карбіду бору, легованого бором у травленому стані.

Fig. 2. Elongated SiC crystals in the microstructure of the reaction-bonded boron, carbide doped with boron after etching.

Рис. 3. Мікроструктура дифузійного шару реакційно-зв'язаного карбіду бору, легованого бором.

Fig. 3. Microstructure of diffusion layer of reaction-bonded boron carbide doped with boron.

Дослідження отриманих реакційно-зв'язаних зразків композиційної кераміки на основі карбіду бору показали, що структура матеріалу – це карбід бору, армований голчастими кристалами вторинного карбіду кремнію. Така структура може призвести до підвищення механічних і термомеханічних властивостей, що підтверджується експериментальними дослідженнями фізико-механічних характеристик матеріалу.

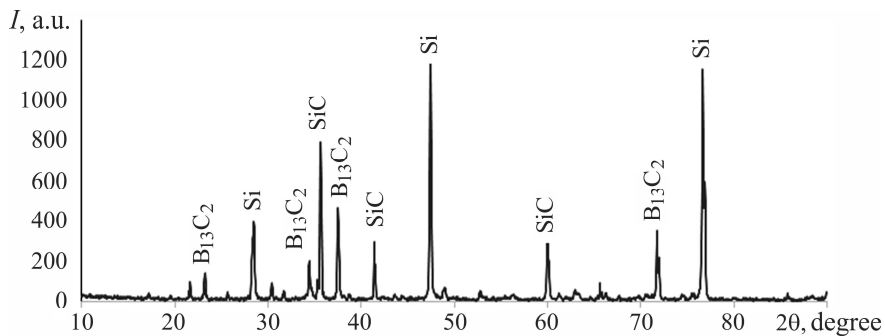


Рис. 4. Рентгенограма реакційно-зв'язаного карбіду бору, легованого бором.

Fig. 4. XRD pattern of reaction-bonded boron carbide, doped with boron.

До того ж утворення дрібних частинок карбіду бору внаслідок розтравлювання поверхні крупних полікристалів карбіду бору може забезпечити додаткову міцність композиційної кераміки.

Як свідчать результати рентгенографічного аналізу, весь вільний бор взаємодіє з карбідом бору (3) без залишку. Тому на рентгенограмі присутні лише з'єд-

нання бору. Водночас кремній частково витрачається на хімічні процеси у розплаві, а частково залишається у вільному стані.

Фізико-механічні властивості матеріалу $B_4C-SiC-Si$ складу (wt%): 67 B_4C ; 21 SiC ; 12 Si наведено в таблиці.

Фізико-механічні властивості матеріалу $B_4C-SiC-Si$, отриманого активованим спіканням

Властивості	$B_4C-SiC-Si$
Питома маса, kg/m^3	2440
Термостійкість	Після 3 cycles тріщин не виявлено
Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} , $MPa \cdot m^{1/2}$	$10,4 \pm 1,1$
Твердість матеріалу, GPa	$26 \pm 1,6$
Границя міцності за згину, MPa	$311,1 \pm 9,4$
Модуль пружності за згину, GPa	$455,2 \pm 7,2$
Границя міцності за стиску, MPa	1670 ± 60
Границя міцності за розтягу, GPa	169 ± 11

Найвище значення тріщиностійкості реакційно-зв'язаного карбіду бору, отриманого активованим спіканням, яке порівняно з іншими керамічними матеріалами на основі B_4C і SiC , обумовлене утворенням армувальної фази у вигляді голчастих кристалів SiC , які перешкоджають руху тріщин. Структурні напруження також виникають у матеріалі через різницю коефіцієнтів теплового розширення B_4C ($5,7 \cdot 10^{-6} K^{-1}$), SiC ($3,9 \cdot 10^{-6} K^{-1}$) та Si ($3,1 \cdot 10^{-6} K^{-1}$), що призводить до об'ємного стиснення кремнієвих фазових включень, збільшення густини дислокацій та пластичності Si [6]. Матеріал має міцність на вигин на рівні існуючих матеріалів із самов'язаного карбіду кремнію, і в 2–3 рази вищу в'язкість руйнування. Це дає змогу використовувати його під час проектування теплозахисних покриттів виробів ракетно-космічної техніки, наприклад, орбітального космічного корабля.

Схема спроектованого теплозахисного покриття у вигляді окремих плиток зі зовнішньою панеллю з полікристалічного реакційно-зв'язаного карбіду бору і внутрішньою теплоізоляцією наведена на рис. 5а. Для запобігання руйнування матеріалу через різницю коефіцієнтів термічного розширення теплозахисту й силових конструкцій, які виготовляють зі сплавів алюмінію, теплозахист механічно рухомо кріплять до підкладки. Товщина теплоізоляції, яка забезпечує задану температуру силової оболонки корпусу (не більше $200^\circ C$), визначена на підставі рівняння теплопровідності і дорівнює 26 mm. Проектування плитки змодельовано на основі аналізу напружено-деформованого стану конструкції за механічного навантаження з максимальними розрахунковим тиском 0,065 MPa і температурою $1100^\circ C$ за допомогою програми MSC.Patran5 (рис. 5b, c). Встановлено, що коефіцієнти запасу міцності і стійкості у всьому діапазоні польотних навантажень становлять не менше 3,11 і 17,7, відповідно, за необхідного значення 1,0, що свідчить про роботоздатність конструкції.

Для перевірки відповідності теплозахисного покриття зі зовнішньою панеллю з реакційно-зв'язаного карбіду бору вимогам щодо маси ($10 kg/m^2$) розраховали поверхневу густину теплозахисту ($8,8 kg/m^2$), що на 12% нижче існуючих перспективних багат шарових покриттів для навітряної частини космічного літака [12].

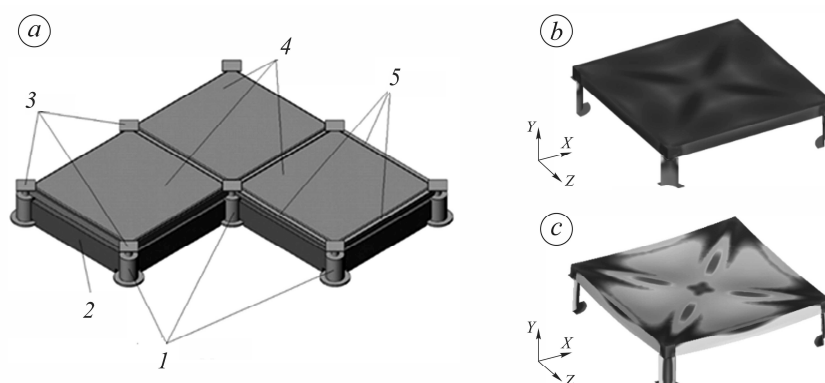


Рис. 5. Теплозахисне покриття космічного літака зі зовнішньою панеллю з реакційно-зв'язаного карбіду бору: *a* – схема теплозахисного покриття; *b, c* – напружено-деформований стан у плиті за тиску 0,065 МПа і температури 1100°C, відповідно: 1 – опори; 2 – теплоізоляційна кераміка; 3 – заглушки-прижими; 4 – зовнішня керамічна плитка; 5 – забивка металевих швів.

Fig. 5. Heat shield of a spacecraft with an outer panel of reactive-bonded boron carbide material: *a* – chart of the heat-protective coating; *b, c* – stress-strain state in the tile at a pressure of 0.065 MPa and at a temperature of 1100°C, respectively: 1 – supports; 2 – heat-insulating ceramics; 3 – plugs-clamps; 4 – external ceramic tile; 5 – caulking of metal seams.

Випробовували зразки високотемпературної конструкційної кераміки з реакційно-зв'язаного карбіду бору, яку розробили в НТУУ “Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського” і яка призначена для аерокосмічної техніки в умовах надзвукового високотемпературного струменя продуктів згоряння на стенді ПІМ НАН України [13]. Результати вимірювань теплоємності приладом ІТ-с-400 і розрахунковим методом в інтервалі 40...440°C добре узгоджуються між собою: максимальне відхилення між ними не перевищує 62 J/(kg·K), середнє квадратичне відхилення – 46 J/(kg·K). Результати розрахунку температурної залежності коефіцієнта теплопровідності конструкційної кераміки системи $B_4C-SiC-Si$ в діапазоні температур від кімнатної до 1400°C показують, що він зростає від ~10 до 25 W/(m·K). Аналіз похибок залежить від температурного діапазону і для температур 0...700°C точність визначення температурної залежності теплопровідності становить $\pm 0,2$ W/(m·K), в діапазоні 700...1100°C – $\pm 0,5$ W/(m·K), вище 1100°C – 1,2 W/(m·K).

Дослідження на жаростійкість показали, що впродовж перших 30 min нагрівання маса інтенсивно змінюється, потім ця зміна зменшується приблизно вдвічі і далі до кінця випробувань залишається сталою. Після 3 h нагрівання зміна маси зразків не перевищує 2,7%, а зовнішній вигляд поверхні, яка нагрівається, та тильної поверхні практично ідентичні – вони зберігають чорний колір, світлі сліди окиснення відсутні.

Результати досліджень термостійкості показали, що зміна маси першого зразка – 0,93% від початкової маси, другого – 0,74%. Після перших двох циклів нагрівання поверхні обох зразків не мали видимих змін, однак, за подальших циклів спостерігали втрату глянцевого блиску і поступове збільшення шорсткості. Це є ознаками початку руйнування покриття поверхні за нагріву, але це вирішується терміном експлуатації. Головне – матеріал зберігає цілісність, робоздатність за високих температур упродовж тривалого часу, тріщини відсутні, втрата маси стала.

Дослідження теплофізичних властивостей показали, що матеріал на основі карбіду бору характеризується відносно високою теплопровідністю (> 21 W/(m·K))

за температур вище 1000°C, володіє високими коефіцієнтом випромінювання, жаро- і термоерозійною стійкістю до дії окисного високошвидкісного газового потоку за температури поверхні 1400°C. Ця комбінація властивостей робить розглянутий матеріал перспективним об'єктом для подальших досліджень щодо застосування як високотемпературного конструкційного матеріалу аерокосмічної техніки.

ВИСНОВКИ

Вперше одержано реакційно-зв'язаний карбід бору активованим спіканням внаслідок дифузійного насичення бором та кремнієм вихідного порошку В₄С. Встановлено на основі рентгеноструктурного і мікроструктурного аналізів, що структура матеріалу – це зерна карбіду бору, армовані голчастими кристалами вторинного карбіду кремнію. У результаті вдалося підвищити критичний коефіцієнт інтенсивності напружень до $\sim 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, що підтверджено експериментальними дослідженнями і дає змогу застосовувати розроблений матеріал для проектування теплозахисних покриттів гіперзвукових космічних літаків.

1. *Thevenot F.* Boron carbide – A comprehensive review // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 1990. – **6**, № 4. – Р. 205–225. [https://doi.org/10.1016/0955-2219\(90\)90048-K](https://doi.org/10.1016/0955-2219(90)90048-K)
2. Low-temperature synthesis of boron carbide ceramics / I. V. Solodkyi, I. Bogomol, M. Ya. Vterkovs'kyi, and P. I. Loboda // *J. of Superhard Mat.* – 2018. – **40**, № 4. – Р. 236–242. DOI: 10.3103/S1063457618040020
3. *Овсиенко А. И., Румянцев В. И., Орданьян С. С.* Керамика на основе реакционно-спеченного карбида бора // *Новые огнеупоры.* – 2018. – № 10. – С. 9–15.
4. *Daniel M. P. and Frage N.* Reaction bonded boron carbide: recent developments // *Adv. in Appl. Ceram.* – 2012. – **111**, № 5–6. – Р. 301–310. DOI: 10.1179/1743676111y.0000000078
5. *Динамическая прочность реакционно-спеченной керамики карбида бора / А. С. Савиных, Г. В. Гаркушин, С. В. Разоренов, В. И. Румянцев* // *Журн. техн. физики.* – 2015. – **85**, Вып. 6. – С. 77–82.
6. *Robust design and manufacturing of ceramic laminates with controlled thermal residual stresses for enhanced toughness / N. Orlovskaya, M. Lugovy, V. Subbotin, and O. K. Radchenko* // *J. Mat. Sci.* – 2005. – **40**. – Р. 5483–5490. DOI:10.1007/s10853-005-1923-x
7. *Hierarchical composites of B4C–TiB2 eutectic particles reinforced with Ti / I. Solodkyi, I. Bogomol, V. Bolbut, P. Loboda, A. Kuncser, O. Vasylykiv, and P. Badica* // *Ceram. Int.* – 2020. – **46**, № 18. – Р. 28132–28144. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.312>
8. *Гегузин Я. Е.* Физика спекания: монография. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. – 312 с.
9. *Капустинский А. Ф.* Термодинамика химических реакций и ее применение в металлургии и неорганической технологии. Изд. 2, расшир. и перераб. – М.–Л.: ОНТИ, Гл. ред. лит-ры по цветной металлургии, 1936. – 308 с.
10. *Горелочное устройство двухкаскадной конфигурации для высокоскоростного воздушно-топливного напыления на жидком топливе / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, Г. А. Фролов, С. В. Бучаков* // *Вісник двигунобудування.* – Запорожье: АО “Мотор Сич”, 2015. – № 2. – С. 143–148.
11. *TU У 33.2-33056998-001:2009 АКОН.422500.003.* Техническое описание модуля преобразования сигналов расходомера WAD-RS-BUS(USB) – 22с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.akon.com.ua>.
12. *Thermal protection tile structures of shuttlecraft with deferent external load-carrying elements / V. G. Ticky, V. V. Gusev, A. M. Potapov, E. I. Shevtsov, I. A. Gusarova, T. A. Manko, and Y. V. Falchenko* // *The Paton Welding J.* – 2015. – № 3–4. – Р. 63–64.
13. *Теплофизические характеристики и термоэрозийная стойкость керамического материала на основе карбида бора / Ю. И. Евдокименко, И. А. Гусарова, Г. А. Фролов, В. М. Кисель, С. И. Бучаков* // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2020. – **8**, № 168. – С. 136–144.

Одержано 04.07.2022