

## ВИСНОВОК

### про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

на тему “Створення армованих керамічних матеріалів на основі  $B_4C$  для роботи в екстремальних умовах експлуатації”, асистента кафедри ВТМ та ПМ Втерковського Михайла Ярославовича, поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство

Розширений фаховий семінар проведений на кафедрі Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії «03» вересня 2021 року, протокол № 4.

**1. Актуальність теми дослідження.** В наш час керамічні матеріали все частіше використовуються у світовій промисловості. Так, основними галузями використання кераміки стали машинобудування, електроніка, електротехніка, оборонна галузь та енергетика. Завдяки унікальному поєднанню фізико-механічних та технологічних властивостей, конструкційні керамічні матеріали все частіше витісняють метали та сплави. Керамічні конструкційні вироби на основі  $ZrO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiC$  та  $B_4C$  займають близько 25 % від загального світового виробництва конструкційних матеріалів. Дослідниками прогнозується збереження тенденції зростання застосування керамічних матеріалів з часом.

Вироби з карбіду бору ( $B_4C$ ) все частіше застосовуються у різних галузях промисловості. Карбід бору поєднує в собі комплекс фізичних, хімічних та механічних характеристик. Висока твердість карбіду бору зумовлює його використання в якості ріжучих та абразивних керамічних матеріалів. В той же час карбід бору застосовується як матеріал для стрижнів у ядерних реакторах для регулювання ядерних реакцій. Завдяки високій хімічній стійкості до агресивних середовищ, карбід бору широко застосовується в хімічній промисловості. Слід додати, що матеріали з карбіду бору використовуються в електроніці (завдяки напівпровідниковій природі  $B_4C$ ) та в військовій галузі (виготовлення елементів бронезахисту).

Проте, сильна ковалентна природа хімічного зв'язку та низький коефіцієнт дифузії карбіду спонукає до використання високих температур для отримання високощільних керамічних виробів з карбіду бору. В той же час, отримання високощільних виробів з високими механічними характеристиками накладає певні обмеження на використання грубих вихідних порошоків карбіду бору. Більш того, кераміка на основі карбіду бору має низьку тріщиностійкість ( $1-2,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ), що значно обмежує її практичне застосування.

Одним із перспективних методів отримання кераміки на основі карбіду бору є інфільтрація поруватої заготовки з порошку карбіду бору розплавом кремнію. Даний підхід передбачає отримання кераміки на основі карбіду бору за температур, що не перевищують  $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ . Більш того, дозволяє

отримувати великогабаритні вироби. Проте, сам процес інфільтрації залежить від багатьох чинників: від розміру частинок вихідного порошку, наявності домішок у порошку, температури інфільтрації, кількості легкоплавкої сполуки при просоченні і т.д.

Практика отримання високощільних керамічних матеріалів на основі карбіду бору ставить ряд питань стосовно технології інфільтрації, а також підвищення механічних характеристик кераміки, що значно обмежує її застосування.

## **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках наступних наукових тем і проектів:

Науково-дослідна робота 2001-ф «Фізико-хімічні основи низькотемпературного синтезу (700 – 1500 °С) ультратугоплавкої високоміцної армованої кераміки та металокераміки поліфункціонального застосування) (№ держреєстрації 0117U004301 Інженерно – фізичного факультету, 2016 – 2019 рр.).

Основні положення дисертаційної роботи спрямовані на створення проривних матеріалознавчих технологій для зміцнення обороноздатності країни у відповідності до урядових рішень (Розпорядження КМУ від 24.12.2019 року №1358-р «Про внесення змін додатки 1 і 2 до розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 серпня 2017 р. № 600 щодо ПЕРЕЛІКУ критичних технологій у сфері виробництва озброєння та військової техніки, якими є технології створення засобів ураження та захисту від них; технології розроблення і виробництва нових засобів ураження та боеприпасів; технології розроблення та виробництва бронематеріалів).

## **3. Наукова новизна отриманих результатів.**

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

- вперше встановлено, що застосування епоксидного пластифікатора під час формування заготовок із порошку карбіду бору та їх наступної інфільтрації розплавом кремнію забезпечує формування  $\alpha$ -SiC фази зерен карбіду кремнію витягнутої форми, наявність яких призводить до підвищення твердості композита в цілому;

- вперше встановлено вплив природи вуглецевмісної зв'язки та тиску формування на зміну фазового складу пресовок із порошку  $B_4C$ , інфільтрованого розплавом Si. Доведено, що збільшення тиску пресування призводить до підвищення швидкості інфільтрації та збільшення часу контакту частинок порошку  $B_4C$  з розплавом Si та їх перекристалізації з утворенням фаз SiC та вторинного  $B_4C$ ;

- вперше встановлено, що додавання вуглецевих волокон до вихідного порошку карбіду бору забезпечує, в процесі інфільтрації розплавом кремнію, формування кераміки на основі карбіду бору, армованої композиційними волокнами зі структурою «ядро (C) – оболонка (SiC)». На основі встановленої концентраційної залежності доведено, що максимальне

значення міцності  $510 \pm 27$  МПа досягається при армуванні кераміки 10 мас. % вуглецевих волокон;

- вперше встановлена концентраційна залежність модуля пружності армованої кераміки  $B_4C-Si$  від вмісту вуглецевих волокон. Доведено, що по мірі збільшення концентрації вуглецевих волокон з 5 до 20 мас.% модуль пружності зростає, і досягає максимуму 380 ГПа при вмісті вуглецевих волокон 20 мас.%;

- вперше встановлено, що обробка в полі температурного градієнту кераміки з фазовим складом  $B_4C-SiC-(15-25 \text{ мас.}\%) Si$  більш як в 10 разів збільшує швидкість перекристалізації карбіду бору через розплав кремнію та забезпечує формування каркасу з карбіду бору з мінімальною кількістю вільного кремнію (менше 5 мас.%).

#### **4. Теоретичне та практичне значення результатів дисертації.**

Згідно до отриманих науково-експериментальних результатів розроблено технологію отримання армованих композиційних матеріалів на основі  $B_4C$  методом інфільтрації розплаву кремнію. Застосування армування вуглецевими волокнами дозволяє збільшити механічні властивості інфільтрованої кераміки. За розробленою технологією було отримано керамічні пластини, для використання в якості складових елементів бронезахисту, елементів кромки планера безпілотних літальних апаратів.

Інфільтрована кераміка на основі  $B_4C$  армована вуглецевими волокнами характеризується високими механічними характеристиками (твердістю та міцністю на згин), та може конкурувати з провідними керамічними матеріалами отриманими гарячим пресуванням.

Отримана кераміка на основі карбіду бору пройшла випробування в складі композитного бронезахисту на базі Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України. Елементи персонального бронезахисту в поєднанні з мінімальною вагою відповідають 6 -му класу захисту. Розроблена технологія є простішою та дешевшою в порівнянні з наявними аналогами.

#### **5. Використання результатів роботи.**

Отримані результати використано у науково-дослідній роботі №254-17 «Розробка композиційного матеріалу з керамічною матрицею для теплозахисних плиток» Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» для виготовлення деталей апогейних двигунів космічних апаратів та для створення конструкційних елементів безпілотних літальних апаратів.

Також армовані керамічні матеріали на основі  $B_4C$  можуть застосовуватися для виробництва елементів персонального бронезахисту, цивільної та військової техніки з метою захисту від вогнепальної зброї та вибухової дії.

Фізико-механічні характеристики отриманої кераміки дозволяють надати рекомендації щодо її використання як основного матеріалу для конструкційних елементів (ущільнювачів) гідросистем для перекачки агресивних середовищ (нафти та газу).

**6. Особиста участь автора** в одержанні наукових та практичних результатів, що викладені в дисертаційній роботі.

Автор брав участь у всіх етапах дослідження: формулюванні мети та завдання досліджень, плануванні та проведенні експериментів, аналізі та узагальненні отриманих результатів. Автор приймав активну участь в написанні статей та звітів на основі отриманих результатів разом зі співавторами.

Постановка задачі дослідження, обговорення отриманих результатів проведені з науковим керівником академіком НАН України, доктором технічних наук, професором Лободою П.І. та старшим науковим співробітником кафедри ВТМ та ПМ, к.т.н. Солодким Є.В.

Безпосередньо автором було виготовлено всі досліджувані зразки, проведено механічні випробування (дослідження мікротвердості зразків та модуля пружності зразків), дослідження електропровідності та КТР, мікроструктурний та рентгенофазовий аналіз.

Розглянувши звіт подібності щодо перевірки на плагіат, рецензенти дійшли висновку, що дисертаційна робота Втерковського М.Я. є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Дисертація характеризується єдністю змісту та відповідає вимогам щодо її оформлення.

**7. Перелік публікацій за темою дисертації** із зазначенням особистого внеску здобувача.

За результатами дослідження опубліковано 10 наукових праць, у тому числі 3 статі у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у виданнях іноземних держав, які включені до міжнародних наукометричних баз), 7 тез доповідей в збірках матеріалів конференції.

1. Solodkyi I. V. Low- Temperature Synthesis of Boron Carbide Ceramics / I. V. Solodkyi, I. I. Bogomol, **М. Я. Втерковський**, P. I. Loboda // Journal of Superhard Materials, Vol. 40, No. 4, 2018, pp. 236–242. *Особистий внесок здобувача*: отримання зразків для дослідження, аналіз експериментальних даних (Scopus)

2. Addition of Carbon fibers into B<sub>4</sub>C infiltrated with molten silicon / I. Solodkyi, O. Bezdorozhev, **М. Втерковський** [et. al.] // Ceramics International, Volume 45, Issue 1, January 2019, Pages 168-174. *Особистий внесок здобувача*: отримання порошкової суміші, пресування та інфільтрація отриманих зразків, підготовка зразків для досліджень мікроструктури та механічних властивостей, дослідження мікроструктури отриманих зразків, аналіз експериментальних даних (Scopus)

3. **Втерковський М. Я.** Вплив технологічних параметрів на фазовий склад, структуроутворення та механічні властивості кераміки на основі карбиду бору отриманої методом інфільтрації / **М. Я Втерковський**, Є.

В. Солодкий, П. І. Лобода // Проблеми тертя за зношування, Випуск 89, №1, 2020. С. 38-50. *Особистий внесок здобувача*: отримання порошкової суміші, пресування та інфільтрація отриманих зразків, підготовка зразків для досліджень, дослідження мікроструктури, фазового складу отриманих зразків, проведення дослідження механічних характеристик, обговорення отриманих результатів.

4. Лобода П. І., Солодкий Є. В., Богомол Ю. І., **Втерковський М. Я.** Армована кераміка – захист нового покоління. Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки V Міжнародна науково-практична конференція, Київ, Україна, 11 – 12 жовтня 2017 р. – С. 161-162. *Особистий внесок здобувача*: аналіз отриманих експериментальних даних.

5. **Втерковський М.Я.**, Лобода П.І., Солодкий Є.В. Вплив тиску пресування на формування структури керамічних матеріалів на основі карбіду бору отриманих методом інфільтрації / Матеріали VII-ї Міжнародної наукової конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах», Київ, Україна, 30. 11. 2017 – 02. 12. 2017 р. С. 54. *Особистий внесок здобувача*: отримання зразків для дослідження, мікроструктурні дослідження, аналіз отриманих результатів.

6. Солодкий Є.В., **Втерковський М.Я.**, Богомол Ю. І., Лобода П.І. Низкотемпературний синтез високоплотної кераміки на основі карбіда бора / Матеріали VI-ї Міжнародної Самсонівської конференції «Матеріалознавство тугоплавких сполук», Київ, Україна, 22 – 24 травня 2018 р. С. 85. *Особистий внесок здобувача*: аналіз та підготовка до публікації отриманих даних.

7. **Втерковський М. Я.**, Солодкий Є.В., Богомол Ю. І., Болбут В. В., Лобода П.І. Влияние концентрации углеродных волокон на механические свойства керамики на основе карбида бора полученной методом инфильтрации / Матеріали VI-ї Міжнародної Самсонівської конференції «Матеріалознавство тугоплавких сполук», Київ, Україна, 22 – 24 травня 2018 р. С. 86. *Особистий внесок здобувача*: отримання порошкової суміші, пресування та інфільтрація отриманих зразків, підготовка зразків для досліджень механічних властивостей, аналіз отриманих даних, підготовка до опублікування.

8. Solodkyi, M. Vterkovskiy, I. Bogomol, P. Loboda. Infiltration of boron carbide with different content of carbon fibers // Catalogue of “10th International conference: Advanced materials and technologies”, 24-26 October 2018, Ninghai, China, P. 98. *Особистий внесок здобувача*: отримання порошкової суміші, пресування та інфільтрація отриманих зразків, аналіз отриманих експериментальних даних.

9. P. Loboda, M. Vterkovskiy, I. Bogomol, I. Solodkyi. Synthesis of high-density boron-carbide-based ceramics using intensive recrystallization conditions // Catalogue of “10th International conference: Advanced materials and technologies”, 24-26 October 2018, Ninghai, China, P. 97. *Особистий внесок*

здобувача: отримання порошкових сумішей, формування отриманих сумішей.

10. I. Solodkyi, M. Vterkovskiy, I. Husarova, I. Bogomol, P. Badica, P. Loboda. Boron carbide based ceramics: synthesis, properties, applications // 7<sup>TH</sup> International samsonov conference "materials science of refractory compounds" (MSRC), Kyiv, Ukraine, May 25-28, 2021. – P. 29. *Особистий внесок здобувача: аналіз та підготовка до публікації отриманих даних.*

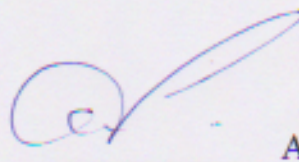
ВВАЖАТИ, що дисертаційна робота дисертаційна робота Втерковського Михайла Ярославовича «Створення армованих керамічних матеріалів на основі В<sub>4</sub>С для роботи в екстремальних умовах експлуатації», яка подана на здобуття ступеня доктора філософії, за своїм науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам пп.9, 10, 11 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167, та відповідає напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми КПІ ім.Ігоря Сікорського зі спеціальності 132 Матеріалознавство.

#### РЕКОМЕНДУВАТИ:

Дисертаційну роботу «Створення армованих керамічних матеріалів на основі В<sub>4</sub>С для роботи в екстремальних умовах експлуатації», подану Втерковським Михайлом Ярославовичем на здобуття ступеня доктора філософії, до захисту.

Рецензенти:

к.т.н., професор, професор  
кафедри ВТМ та ПМ



Анатолій СТЕПАНЧУК

д.т.н., професор, професор  
кафедри ВТМ та ПМ



Олександра ЮРКОВА

06.09.21р.

