

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Втерковського Михайла Ярославовича**

на тему: "Створення армованих керамічних матеріалів на основі В<sub>4</sub>С для роботи в екстремальних умовах експлуатації",

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань

13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

### **Актуальність теми дисертації**

Стрімкий розвиток сучасного машинобудування ставить все нові вимоги до матеріалів, які працюють в різноманітних умовах роботи (ударні навантаження, знакозмінні напруження, термічні та магнітні поля, абразивне зношування тощо). Принциповою проблемою в сучасному матеріалознавстві є проектування та створення принципово нових матеріалів із наперед заданими властивостями, які б успішно використовувались в авіо-, ракетобудуванні, атомній енергетиці чи радіоелектроніці. Задовільнити колосальну прогалину в даній області можливо виключно застосовуючи системний підхід в дослідженнях, а саме розглядаючи та проектуючи властивості матеріалу на атомному рівні, переходячи на макро- і мікро рівні, та встановлювати такі технологічні параметри, які б змогли реалізувати поставлену задачу. На сьогодні особливу увагу рядом вчених приділяють керамічним та металокерамічним матеріалам на основі карбіду бору. Такий матеріал добре працює в ядерній енергетиці через високий перетин поглинання нейтронів, має високу твердість, міцність яка зберігається і за підвищених температур, абразивну та корозійну стійкість. Одна на фоні ряду переваг, карбід бору має і ряд недоліків, а саме низьку тріщиностійкість, низькі значення окисної та термостійкості. Окрім наведених недоліків варто зазначити низьку технологічність отримання виробів з карбіду бору, а саме отримання безпористих виробів.

Вищенаведене обумовлює **актуальність** теми дисертаційної роботи Втерковського М. Я., яка присвячена дослідженню впливу технологічних параметрів одержання, обробки та армування кераміки на основі В<sub>4</sub>С, отриманої методом інфільтрації на мікроструктуру, фазовий склад та механічні властивості кераміки та створенню на основі отриманих результатів армованих керамічних матеріалів на основі карбіду бору для роботи в екстремальних умовах експлуатації.

Підтвердженням актуальності дисертаційної роботи є її зв'язок з науково-дослідною роботою «Фізико-хімічні основи низькотемпературного синтезу (700–1500 °С) ультратугоплавкої високоміцної армованої кераміки та металокераміки поліфункціонального застосування) (№ держреєстрації 0117U004301 Інженерно – фізичного факультету, 2016 – 2019 рр.). Також слід зазначити, що 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.

### **Оцінка змісту та завершеності дисертації**

Дисертаційна робота Втерковського М. Я. складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 153 сторінки, об'єм основного тексту 129 сторінок, список використаних джерел включає 107 найменувань.

У **вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми дослідження, встановлено зв'язок роботи з науковими програмами, сформовано мету і завдання досліджень, вказано об'єкт та предмет дослідження, представлено методи досліджень властивостей та статистичної обробки результатів, визначено наукову новизну і практичне значення роботи. Вказано особистий внесок здобувача, дані про апробацію і публікацію результатів досліджень та структуру і обсяг дисертації.

У **першому** розділі здійснено аналіз науково-технічних та патентних джерел про історію походження, сучасний стан методів отримання виробів на основі карбиду бору. Дисертант в повній мірі аргументував практичність застосування методу інфільтрації для виготовлення кераміки на основі карбиду бору з високими механічними характеристиками. В повній мірі розкрито вплив різних факторів на процес інфільтрації.

У **другому** розділі роботи зазначено методики дослідження, технологічні параметри отримання високощільної інфільтрованої кераміки на основі карбиду бору та характеристики вихідних матеріалів, використані дисертантом під час дослідження.

У **третьому** розділі представлені закономірності структуроутворення, формування фазового складу, зміни механічних характеристик кераміки на основі В<sub>4</sub>С

в залежності від різних технологічних режимів. Зазначено зміну фазового складу кераміки на основі  $B_4C$ , інфільтрованої розплавом кремнію від тиску пресування: зменшення вмісту фази  $B_4C$  (з 53 об. % по 46 об. %) та  $SiC$  (з 23 об.% по 18 об. %) із зменшенням вихідної пористості з 49 % і по 33 % за рахунок реакції додаткового вуглецю з розплавом кремнію з утворенням зерен  $SiC$ .

У **четвертому** розділі дисертантом представлено результати впливу армування вуглецевими волокнами на структуру, фазовий склад та фізико-механічні характеристики інфільтрованої кераміки на основі  $B_4C$ . Цікавим результатом є утворення фази  $B_{12}(B,C,Si)_3$  при низькому вмісті вуглецевих волокон (5 мас. %) та відсутність даної фази при подальшому збільшенню вміст вуглецевих волокон. Максимальне значення міцності на згин  $510 \pm 27$  МПа досягається при армуванні 15 мас. % вуглецевих волокон за рахунок утворення волокон  $SiC-C$  в процесі інфільтрації розплавом кремнію. Проаналізовано вплив армування вуглецевими волокнами на теплові та електричні властивості армованої інфільтрованої кераміки на основі карбиду бору.

У **п'ятому** розділі дисертантом досліджено вплив обробки в полі контрольованого температурного градієнту на структуру, фазовий склад та властивості кераміки на основі  $B_4C$ . Дисертантом доведено, що збільшення швидкості переміщення контрольованого температурного градієнту від 5 до 10 мм/хв призводить до зміни фазового складу та розміру утворених зерен. Застосування обробки з використанням контрольованого температурного градієнту із швидкістю 10 мм/хв призводить до зникнення потрійної фази  $B_{12}(B,C,Si)_3$  та до формування фази  $B_4C$  з меншим розміром зерен. Встановлено технологічні умови отримання високих механічних характеристик кераміки на основі  $B_4C$ .

Сформульовані в роботі висновки відповідають основному змісту проведених досліджень і тексту дисертаційної роботи та відображають основні наукові результати роботи.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна**

Основні наукові положення та отримані результати представлені в дисертації Втерковського М. Я. достатньо обґрунтовані. В роботі дисертантом чітко визначено мету і основні завдання наукового дослідження, а також об'єкт та предмет

дослідження. Вирішення поставлених завдань здійснювалося з використанням перевіреного та атестованого обладнання, згідно існуючих стандартів та оригінальних методик. Застосування фундаментальних наукових основ, які апробовано за допомогою сучасних методів дослідження (лазерна гранулометрія, електронна мікроскопія, високотемпературна дилатометрія, методи визначення фізико-технологічних характеристик матеріалів) дозволило отримати достовірні результати дослідження, які добре корелюються з дослідженнями провідних вчених у сфері отримання композиційних матеріалів на основі карбіду бору.

### **Основні наукові результати та їх наукова новизна**

До найбільш вагомих наукових положень, отриманих в результаті виконання даної роботи, на мій погляд відносяться наступні:

- 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, що призводить до підвищення твердості в цілому.

- Встановлено вплив армування вуглецевими волокнами на механічні властивості (міцність на згин та модуль пружності) армованої кераміки на основі карбіду бору. Доведено, що максимальне значення міцності на згин 510 МПа досягається при вмісті волокон 10%, а модуля пружності 380 ГПа - при 20%;

- Вперше встановлено вплив обробки кераміки з фазовим складом  $B_4C$ -SiC-(15-25 мас. %) Si в полі температурного градієнту, яка інтенсифікує перекристалізацію карбіду бору через розплав кремнію та забезпечує формування каркасу з карбіду бору з мінімальною кількістю вільного кремнію (менше 5 мас. %).

Крім зазначеної наукової новизни, результати дисертаційної роботи Втерковського М. Я. на мій погляд мають важливе практичне застосування, адже запропоновані та застосовані технологічні схеми отримання армованої кераміки можуть бути рекомендованими для виробництва виробів, які працюють в умовах екстремальних термічних та механічних навантажень.

### **Повнота викладу результатів дисертації в публікаціях**

Основний зміст дисертаційної роботи Втерковського М. Я. викладений у 10 наукових працях, з яких 2 статті, що включені до міжнародної наукової бази даних

SCOPUS, 1 стаття у фахових виданнях України. Результати апробовані на 7 конференціях. Аналізуючи внесений доробок автора, можна стверджувати, що матеріали дисертаційної роботи пройшли широку апробацію, є достовірними та науково-обґрунтованими.

### Зауваження по дисертації

1. З табл. 3.1 та рис. 3.7,а випливає, що збільшення тиску пресування вихідних заготовок і, як наслідок, зменшення поруватості останніх, супроводжується зменшенням вмісту фази  $V_4C$  в інфільтрованих зразках. На жаль, дисертант не навів фізичного пояснення прояву відміченого ефекту. Крім того, такий висновок входить в протиріччя із заявою автора, що “чим більша кількість додаткового вуглецю присутня в зразках (тобто, вочевидь - більша вихідна поруватість заготовок), тим більша кількість утвореної фази  $SiC$  згідно реакції (3.1) і більше вуглецю з вихідного  $V_4C$  братиме участь у утворенні  $SiC$  згідно реакції (3.2)” (стр. 96). Остання теза при цьому якісно підтверджується даними рис. 3.7,б, з якого видно, що зі зменшенням поруватості заготовок вміст  $SiC$  логічно зменшується.

2. Те ж зауваження відноситься до вмісту залишкового кремнію, величина якого збільшується із збільшенням тиску пресування, тобто - зменшенням поруватості вихідних заготовок (рис. 3.7,в).

3. Розділ 3 присвячений, як випливає з його назви, дослідженню особливостей формування структури, фазового складу та механічних властивостей інфільтрованої кераміки  $V_4C$  в залежності від технологічних параметрів отримання та включає підрозділ 3.3 “Вплив технологічних параметрів на механічні властивості інфільтрованої кераміки  $V_4C$ ”. В той же час, в тексті даного розділу практично відсутня інформація щодо будь-яких механічних характеристиках отриманої кераміки крім твердості.

4. Як випливає з тексту дисертації “Значення внутрішніх напружень (рис.4.11 та рис. 4.12), які виникли в керамічних зразках в процесі інфільтрації розраховувалися згідно формули: (4.4), де  $E$  – модуль Юнга складових керамічних зразків: карбід бора (468 ГПа) та вуглецеві волокна (238 ГПа)”. Однак, з тексту роботи роботи незрозуміло, яким же з наведених значень модуля Юнга (враховуючи їх суттєву різницю) користувалися для визначення напружень в інфільтрованій кераміці.

5. В одному з пунктів наукової новизни дисертаційної роботи автор зауважує, що ним «Вперше встановлено, що обробка в полі температурного градієнту кераміки з фазовим складом  $B_4C-SiC$ -(15-25 мас. %) Si більш як в 10 разів збільшує швидкість перекристалізації карбиду бору через розплав кремнію» (стр. 18), хоча в тексті дисертаційної роботи практично відсутні конкретні кількісні показники (отримані експериментальним або теоретичним шляхом), які б підтверджували дану тезу.

6. В тексті дисертаційної роботи наявні ряд термінологічних неточностей. Так, підпис до рис. 3.8 вказує, що на рисунку наведена «Залежність мікротвердості інфільтрованої кераміки на основі  $B_4C$  від пористості». Однак, для щонайменше трифазного матеріалу (як можна бачити з, наприклад, рис. 3.6) термін «мікротвердість» має застосовуватись до кожної з наявних в складі матеріалу фаз, а не слугувати інтегральною характеристикою матеріалу загалом.

Те ж зауваження відноситься і до формулювання «Міцність на розрив зразків (10 мм в діаметрі,  $D$  і 10 мм у висоту,  $W$ )», яку вимірювали згідно зі стандартом ASTM D 3967–95a (стр. 85), хоча в оригіналі вказаного стандарту назва даної методики випробувань (Splitting Tensile Strength) суттєво більш точно відображає використану схему випробувань і може перекладатися як «міцність на розрив при роздавлюванні (розщепленням)». При цьому, враховуючи можливу неоднозначність трактування даної методики, вочевидь було б доцільно навести механічну схему випробувань.

Приведені зауваження, втім, не применшують загальної достатньо високої оцінки дисертаційної роботи та не знижують рівня її наукової цінності.

### **Загальні висновки стосовно дисертаційної роботи.**

На підставі вищенаведеного вважаю, що дисертаційна робота М.Я. Втерковського «Створення армованих керамічних матеріалів на основі  $B_4C$  для роботи в екстремальних умовах експлуатації» є завершеною науковою працею, містить одержані автором нові наукові та прикладні результати в галузі металознавства, які в сукупності розв'язують актуальну науково-технічну задачу створення армованих керамічних матеріалів на основі  $B_4C$  з високими фізико-механічними властивостями для роботи в екстремальних умовах експлуатації.

Дисертаційна робота за обсягом виконаних досліджень, новизною та науковою значимістю отриманих результатів та їх рівнем повністю відповідає вимогам Наказу Міністерства освіти і науки України №40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження

Вимог до оформлення дисертації», та вимогам, передбаченим пунктом 10 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. №167, а її автор – Втерковський Михайло Ярославович – заслуговує присудженню йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 - Матеріалознавство.

**Офіційний опонент,**

Заступник директора з наукової роботи ІІМ  
НАН України, член-кор. НАН України,  
доктор технічних наук, професор



Г. А. Баглюк