

## ВИСНОВОК

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

на тему “Одержання, структура та властивості спрямовано закристалізованих  
сплавів систем  $V_4C-NbB_2-SiC$  і  $V_4C-TaB_2-SiC$ ”,  
Упатова Микити Ігоровича

з галузі знань 13 Механічна інженерія  
за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

Фаховий семінар проведений на кафедрі високотемпературних матеріалів та  
порошкової металургії, ІМЗ ім. Є.О. Патона

«1» липня 2021 року, протокол № 24 .

**1. Актуальність теми** дослідження обумовлена тим, що на сьогоднішній день композити все більше застосовуються у промисловості і народному господарстві, оскільки однофазні матеріали уже не можуть забезпечити необхідний рівень властивостей, необхідний для стрімкого технологічного розвитку, який притаманний ХХІ століттю. Останнім часом особливо виникає проблема створення нових матеріалів для екстремальних умов експлуатації, особливо, для ультрависоких температур, що пов'язано з використанням їх у авіакосмічній сфері.

Дослідження показали, що для використання в умовах ультрависоких температур найбільш придатними є керамічні тугоплавкі сполуки на основі боридів, карбідів і силіцидів, які містять значну частку ковалентної складової в хімічному зв'язку і, завдяки цьому, мають високі температури плавлення та початку повзучості, високу структурну і хімічну стабільність в умовах дії агресивних середовищ.

Останнім часом усе більше робіт спрямовані на одержання подвійних систем на основі безкисневих тугоплавких сполук ( $V_4C-TiB_2$ ,  $V_4C-ZrB_2$ ,  $V_4C-HfB_2$ ,  $V_4C-TaB_2$ ,  $V_4C-SiC$ ,  $V_4C-NbB_2$ ,  $TiB_2-SiC$ ,  $ZrB_2-SiC$ ,  $HfB_2-SiC$  тощо) методами гарячого пресування, електророзрядного спікання та, меншою мірою, спрямованої кристалізації. Такі матеріали демонструють досить високі механічні властивості до температур 1600–1800 °С. Проте для використання за вищих температур експлуатації – понад 1800 °С і вище – потрібно шукати нові перспективні системи.

Відомо, що розмір структурних складових спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів (СЗЕК) відіграє важливу роль у формуванні їхніх фізико-механічних властивостей. Одним із ефективних методів подрібнення структури СЗЕК є застосування мультифазових евтектик. Оскільки діаграми плавкості в системах  $V_4C-Me^{IV-V}B_2$ ,  $Me^{IV-V}B_2-SiC$  і  $V_4C-SiC$  є евтектичного типу, то перспективною для створення нових мультифазових евтектичних композитів на основі карбиду бору є система  $V_4C-Me^{IV-V}B_2-SiC$ . Водночас дослідженню сплавів цієї системи присвячена

тільки невелика кількість робіт, що пов'язано насамперед зі складністю визначення точного евтектичного складу композитів. Практично зовсім невивченими залишаються системи  $V_4C-TaB_2-SiC$  та  $V_4C-NbB_2-SiC$ .

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

Дисертаційна робота відповідає основним науковим напрямам роботи КПІ ім. Ігоря Сікорського і виконувалася в рамках науково-дослідних робіт: 1) «Фізика високотемпературної міцності армованих керамічних матеріалів спеціального, функціонального і біомедичного призначення» (державний реєстраційний номер 0116U003737); 2) «Нові тверді композиційні матеріали на керамічній основі для ріжучого інструменту» (державний реєстраційний номер 0116U006569). Дисертаційна робота виконана на кафедрі високотемпературних матеріалів та порошкової металургії КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках основного наукового напрямку кафедри «Матеріалознавство тугоплавких сполук і композитів». У рамках виконання роботи був отриманий грант ERASMUS+ KA107 № 2018- 1-BE02-KA107-046807 на стажування в Католицькому університеті м. Льовен (Бельгія).

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

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

- Уперше на основі проведених комплексних досліджень експериментально встановлено склади трифазових евтектик у чотирикомпонентних системах  $B-C-Nb-Si$  і  $B-C-Ta-Si$ , які становлять відповідно  $V_4C-15NbB_2-35SiC$  (мол. %) і  $V_4C-8TaB_2-40SiC$  (мол. %). Структура евтектичних композитів складається з матриці карбіду бору, спрямовано армованої включеннями карбіду кремнію, диборидів ніобію і танталу відповідно.

- Уперше встановлено механізм структуроутворення евтектики у трифазовій чотирикомпонентній системі  $B-C-Nb-Si$  під час спрямованої кристалізації, який полягає в тому, що кристалізація трифазової евтектики ( $V_4C+NbB_2+SiC$ ) відбувається як безперервний сумісний ріст дендритних фаз, при цьому двофазова структурна складова ( $SiC+NbB_2$ ) росте в кооперативному режимі, а третя фаза  $V_4C$  синхронно росте в автономному.

- Показано взаємозв'язок між кінетичними параметрами процесу спрямованої кристалізації та структурно-геометричними характеристиками фазових складових евтектичних сплавів систем  $V_4C-NbB_2-SiC$  і  $V_4C-TaB_2-SiC$ . Показано, що зі збільшенням швидкості кристалізації від 1 до 10 мм/хв розміри структурних складових зменшуються від 5,2–9,5 до 1–3 мкм, а за рахунок формування тонко диференційованої структури фізико-механічні характеристики композитів підвищуються.

- Уперше методом безтигельної зонної плавки неспечених порошкових пресовок отримано спрямовано закристалізовані евтектичні сплави  $V_4C-15NbB_2-35SiC$  (мол. %) і  $V_4C-8TaB_2-40SiC$  (мол. %), вивчено та пояснено їхні фізико-механічні характеристики: твердість (до 35,8 ГПа), тріщиностійкість (до  $6,4 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ), модулі пружності (до 462 ГПа), питому електропровідність ( $2,85-3,47 \times 10^4 \text{ См/м}$ ), КТР ( $7,5-9,5 \text{ K}^{-1}$ ) і міцність на згин у проміжку від кімнатної температури до 1600 °С на рівні 250–395 МПа, що в 1,5 разу вище

за міцність спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів у подвійних системах на основі карбиду бору.

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

За результатами проведених наукових досліджень проведений комплекс фізико-механічних досліджень трифазних евтектичних композитів систем  $W_2C-TaB_2-SiC$  та  $W_2C-NbB_2-SiC$ . Зокрема показано взаємозв'язок між структурою та властивостями отриманих композитів, взаємозв'язок між кінетичними параметрами процесу та структурно-геометричними характеристиками фазових складових.

Проведені дослідження структуроутворення у трифазових чотирикомпонентних евтектиках можуть значно розширити теоретичні основи формування структури мультифазних евтектичних сплавів, зокрема в роботі показано, що трифазна евтектика представлена у вигляді проростаючих між собою дендритів та побудовано просторову модель евтектичного чарунку.

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

Розроблено нові надтверді спрямовано армовані керамічні матеріали, які за рахунок високих значень твердості (32-35 ГПа), тріщиностійкості (до  $6,4 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ), високотемпературної міцності на згин (395 МПа) можуть у майбутньому бути застосовані як інструментальні матеріали, а також як високотемпературні конструкційні та функціональні матеріали для вузлів і приладів авіаційної та космічної техніки.

Результати роботи можуть застосовуватись при підготовці лекційних і практичних занять для студентів спеціальності «Матеріалознавство».

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

Основні результати та положення, відображені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. Постановку задач, визначення методів дослідження здійснено спільно з науковим керівником дисертації. Автором були самостійно вибрані системи для дослідження, одержані експериментальні дані, на основі яких визначено оптимальний хімічний склад композитів. Здобувачем самостійно проводились підготовка матеріалів до плавлення, підготовка зразків до мікроструктурних і рентгенофазових досліджень та механічних випробувань. Результати експериментальних досліджень оформлені автором самостійно у вигляді опублікованих статей і тез доповідей. Теоретичні опрацювання результатів дисертаційної роботи проведені спільно з науковим керівником.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі високотемпературних матеріалів та порошкової металургії ІМЗ ім. Є.О. Патона, науковий керівник д.т.н., доц., Богомол Ю.І.

Розглянувши звіт подібності щодо перевірки на плагіат, рецензенти дійшли висновку, що дисертаційна робота Упатова Микити Ігоровича 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 досліджень опубліковано 12 наукових праць, у тому числі, 3 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у періодичному закордонному виданні, що входить до Scopus та 2 статті у фахових виданнях України категорії «А», що входять до Scopus) 1 патент на корисну модель України, 8 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

- 1. Upatov M., Vleugels J., Koval Y., Bolbut V., Bogomol I.** Microstructure and mechanical properties of B<sub>4</sub>C-NbB<sub>2</sub>-SiC ternary eutectic composites by a crucible-free zone melting method. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2021. Vol. 41, No 2. P. 1189–1196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.09.049>. *Особистий внесок здобувача:* підготовка зразків до плавки, підготовка зразків до експериментальних досліджень, проведення мікроструктурних, мікромеханічних досліджень, визначення оптимального складу композита, визначення модуля Юнга, обробка експериментальних даних, написання статті (Scopus).
- 2. Upatov M. I., Abdullaeva E. R., Bolbut V. V., Bogomol Yu. I.** Structure and properties of the directionally crystallized B<sub>4</sub>C-NbB<sub>2</sub>-SiC alloy. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42. P. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457620010074>. *Особистий внесок здобувача:* підготовка зразків до плавки, підготовка зразків до експериментальних досліджень, проведення мікроструктурних, мікромеханічних досліджень, обробка експериментальних даних, написання статті (Scopus).
- 3. Upatov M. I., Abdullaeva E. R., Bolbut V. V., Bogomol Yu. I.** Structure and properties of directionally solidified alloy of B<sub>4</sub>C-TaB<sub>2</sub>-SiC system. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2020. Vol. 42, No 12. P. 1701–1713. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.12.1701>. *Особистий внесок здобувача:* підготовка зразків до плавки, підготовка зразків до експериментальних досліджень, проведення мікроструктурних, мікромеханічних досліджень, обробка експериментальних даних, написання статті (Scopus).  
Патент на корисну модель:
- 4. Богомол Ю.І., Абдуллаєва Е. Р., Солодкий Є.В., Упатов М.І.** Високотемпературний композиційний сплав на основі карбіду бору: деклараційний пат. на корисну модель 131101 Україна: опубл. 10.01.2019, Бюл. №1. *Особистий внесок здобувача:* підготовка зразків до плавки, підготовка зразків до експериментальних досліджень.

Тези доповідей:

5. **Упатов М. І.**, Богомол Ю. І. Структура спрямовано закристалізованого композиту системи  $V_4C-TaB_2-SiC$ . *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 8* : матеріали міжнар. наук. конф., м. Київ, 6-7 груд. 2018. С. 106–108. *Особистий внесок здобувача*: підготовка зразків до плавки, підготовка зразків до мікроструктурних досліджень, обробка експериментальних даних, підготовка до публікації.
6. **Упатов М. І.**, Богомол Ю. І. Структури та властивості композиту  $32V_4C - 30NbV_2 - 38SiC$ . *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 8* : матеріали міжнар. наук. конф., м. Київ, 6-7 груд. 2018. С. 108–110. *Особистий внесок здобувача*: підготовка зразків до мікроструктурних і мікромеханічних досліджень, обробка експериментальних даних, підготовка до публікації.
7. **Упатов М. І.**, Коваль Я. М., Богомол Ю. І. Структура сплавів системи  $V_4C-NbV_2-SiC$  у евтектичній області. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2019* : матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 30-31 трав. 2019. С. 200–203. *Особистий внесок здобувача*: підготовка зразків до мікроструктурних і мікромеханічних досліджень, обробка експериментальних даних, підготовка до публікації.
8. **Upatov M. I.**, Koval Y. M., Bogomol Yu. I. Preparation of  $V_4C-NbV_2-SiC$  ternary eutectic composites by a crucibleless zone melting method. *HighMathTech 2019* : proc. 6th int. conf., Kyiv, 28-30 Oct. 2019. P. 74. *Особистий внесок здобувача*: підготовка зразків до плавки, підготовка зразків до мікроструктурних досліджень, визначення оптимального складу композитів, обробка експериментальних даних, підготовка до публікації.
9. **Upatov M. I.**, Koval Y. M., Bogomol Yu. I. Microstructure of  $V_4C-TaB_2-SiC$  ternary eutectic composites. *HighMathTech 2019* : proc. 6th int. conf., Kyiv, 28-30 Oct. 2019. P. 75. *Особистий внесок здобувача*: підготовка зразків до плавки, підготовка зразків до мікроструктурних досліджень, визначення оптимального складу композитів, обробка експериментальних даних, підготовка до публікації.
10. **Упатов М. І.**, Єфіменко М. Ю., Богомол Ю. І. Механічні властивості потрійних композитів  $V_4C-TaB_2-SiC$ . *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 10* : матеріали міжнар. наук. конф., м. Київ, Україна, 10-11 грудня 2020. С. 99–100. *Особистий внесок здобувача*: підготовка зразків до плавки, підготовка зразків до мікроструктурних і механічних досліджень, обробка експериментальних даних, підготовка до публікації.
11. **Упатов М. І.**, Єфіменко М. Ю., Богомол Ю. І. Спрямовано закристалізований трифазний евтектичний композит системи  $V_4C-TaB_2-SiC$ . XIII *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021* : матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 28-29 квіт. 2021. С. 181–182. *Особистий внесок здобувача*: підготовка зразків до плавки, підготовка зразків до мікроструктурних і механічних досліджень, обробка експериментальних даних, підготовка до публікації.
12. **Упатов М. І.**, Єфіменко М. Ю., Богомол Ю. І. Механічні властивості евтектичного композиту системи  $V_4C-TaB_2-SiC$ . XIII *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021* : матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 28-29 квіт. 2021. С. 183–185. *Особистий внесок здобувача*: підготовка зразків до

плавки, підготовка зразків до мікроструктурних і механічних досліджень, обробка експериментальних даних, підготовка до публікації.

ВВАЖАТИ, що дисертаційна робота Упатова Микити Ігоровича “Одержання, структура та властивості спрямовано закристалізованих сплавів систем  $V_4C-NbV_2-SiC$  і  $V_4C-TaV_2-SiC$ ”, 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 “Одержання, структура та властивості спрямовано закристалізованих сплавів систем  $V_4C-NbV_2-SiC$  і  $V_4C-TaV_2-SiC$ ”, подану Упатовим Микитою Ігоровичем на здобуття ступеня доктора філософії, до захисту.

#### Рецензенти:

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



Анатолій МІНЦЬКИЙ

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



Анатолій СТЕПАНЧУК



11.08.2021р