

# Облікова картка дисертації

## I. Загальні відомості

**Державний обліковий номер:** 0821U102670

**Особливі позначки:** відкрита

**Дата реєстрації:** 29-11-2021

**Статус:** Захищена

**Реквізити наказу МОН / наказу закладу:**



## II. Відомості про здобувача

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Упатов Микита Ігорович

2. Upatov Mykyta I.

**Кваліфікація:**

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

**Вид дисертації:** доктор філософії

**Аспірантура/Докторантура:** так

**Шифр наукової спеціальності:** 132

**Назва наукової спеціальності:** Механічна інженерія. Матеріалознавство

**Галузь / галузі знань:**

**Освітньо-наукова програма зі спеціальності:** Не застосовується

**Дата захисту:** 25-11-2021

**Спеціальність за освітою:** Композиційні та порошкові матеріали, покриття

**Місце роботи здобувача:**

**Код за ЄДРПОУ:**

**Місцезнаходження:**

**Форма власності:**

**Сфера управління:**

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

### **III. Відомості про організацію, де відбувся захист**

**Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради):** ДФ 26.002.054

**Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Код за ЄДРПОУ:** 02070921

**Місцезнаходження:** проспект Перемоги, буд. 37, м. Київ, 03056, Україна

**Форма власності:**

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

### **IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Код за ЄДРПОУ:** 02070921

**Місцезнаходження:** проспект Перемоги, буд. 37, м. Київ, 03056, Україна

**Форма власності:**

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

### **V. Відомості про дисертацію**

**Мова дисертації:**

**Коди тематичних рубрик:** 53.39.31, 81.09

**Тема дисертації:**

1. ОДЕРЖАННЯ, СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ СПРЯМОВАНО ЗАКРИСТАЛІЗОВАНИХ СПЛАВІВ СИСТЕМ В4С-NbB2-SiC і В4С-TaB2-SiC

2. Preparation, structure and properties of directionally solidified alloys of В4С-NbB2-SiC and В4С-TaB2-SiC systems

**Реферат:**

1. Дисертаційна робота присвячена вивченню спрямовано закристалізованих сплавів систем В4С-NbB2-SiC і В4С-TaB2-SiC, зокрема дослідженню їх структури, фазового складу, фізико-механічних і високотемпературних властивостей, а також закономірностей структуроутворення квазіпотрійних евтектичних сплавів. Автором проаналізовано властивості компонентів досліджуваних систем, розглянуто методи отримання спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів, проведено огляд подвійних евтектичних систем типу В4С-MeB2, SiC-В4С і SiC-MeB2 та потрійних евтектичних систем В4С-MeB2-SiC. Розглянуто особливості структуроутворення в евтектичних системах і проаналізовано механічні властивості спрямовано закристалізованих сплавів. За допомогою металографічного аналізу визначено евтектичний

склад сплавів систем  $B4C-NbB2-SiC$  і  $B4C-TaB2-SiC$ :  $B4C-(15-20)NbB2-(33-40)SiC$  та  $B4C-(8-12)TaB2-(38-42)SiC$  (мол. %) відповідно. Уперше експериментально отримано трифазові евтектичні композити  $B4C-NbB2-SiC$  і  $B4C-TaB2-SiC$  із рівномірною структурою вздовж усього зразка. Установлено, що евтектична структура сплавів системи  $B4C-NbB2-SiC$  містить три фази:  $B4C$ ,  $NbB2$ ,  $SiC$ . Трифазова евтектика ( $B4C-15NbB2-35SiC$  мол. %) має ламелярну структуру, в якій карбід бору виступає як матриця з рівномірно розподіленими по всьому об'єму включеннями карбіду кремнію та дибориду ніобію. Для композитів у поперечному до вирощування напрямку спрямованою є текстура фаз  $NbB2$  у напрямку (100),  $SiC$  – у напрямку (111) та  $B4C$  – у напрямку (104). Найбільш направленою є фаза  $SiC$  у напрямку (111), як у поздовжньому, так і в поперечному до вирощування напрямках, для якої розрахований фактор Лотгеринга лежить у межах 0,8–0,9. Структурні складові у трифазовій евтектиці мають такий розмір:  $B4C$  – 4–6 мкм,  $NbB2$  – 1–3 мкм,  $SiC$  – 2–3 мкм. Визначені такі механічні властивості евтектичного композиту  $B4C-15NbB2-35SiC$ : твердість за Віккерсом (35,8 ГПа), тріщиностійкість за навантаження 9,8 Н (6,4 МПа·м<sup>1/2</sup>), модуль Юнга за імпульсним методом (462 ГПа), питома електропровідність (2,85–5,36×10<sup>4</sup> См/м); досліджено коефіцієнт термічного розширення у проміжку температур 22–1600 °С, міцність на згин за кімнатної температури (220 МПа) та за 1600 °С (395 МПа). Структура трифазового евтектичного композиту  $B4C-8TaB2-40SiC$  (мол. %) являє собою рівномірну трифазову евтектику системи  $B4C-TaB2-SiC$  ламелярного типу по всьому об'єму зразка, в якій матрицею виступає карбід бору, а  $SiC$  та  $TaB2$  є армуючими фазами. Загалом сплави систем  $B4C-TaB2-SiC$  та  $B4C-NbB2-SiC$  мають подібну евтектичну структуру. Рентгенофазовий аналіз показав наявність лише таких фаз: карбіду кремнію ( $SiC$ ), карбіду бору та дибориду танталу; жодних інших фаз не виявлено. Встановлено взаємозв'язок між швидкістю кристалізації та лінійним параметром евтектичної структури відповідно до рівняння Джексона – Ханта. Визначено такі механічні властивості евтектичного композиту  $B4C-8TaB2-40SiC$ : твердість за Віккерсом (33–34 ГПа), тріщиностійкість за навантаження 9,8 Н (3,9 МПа·м<sup>1/2</sup>), досліджено коефіцієнт термічного розширення у проміжку 22–1600 °С. Показано, що зі збільшенням швидкості кристалізації від 1 до 10 мм/хв. відбувається зменшення розмірів структурних складових від 5,2 – 9,5 мкм до 1 – 3 мкм. Експериментальні дослідження мікромеханічних властивостей показали, що твердість за Віккерсом і тріщиностійкість зростають зі збільшенням швидкості кристалізації як у поздовжньому, так і в поперечному до вирощування напрямках. Збільшення твердості з підвищенням швидкості кристалізації спрямовано закристалізованих сплавів систем  $B4C-NbB2-SiC$  і  $B4C-TaB2-SiC$  відбувається подібно до правила Холла–Петча. Що стосується тріщиностійкості, то зменшення розмірів структурних складових сприяє зменшенню критичного розміру зародкової тріщини, яка може утворитися при навантаженні. Це також є характерним для спрямовано закристалізованих керамічних евтектик і сприяє підвищенню їх механічних властивостей. Результати аналізу поширення тріщини після індентування свідчать, що найбільш легко тріщина проходить по ділянках матричної фази карбіду бору або включень карбіду кремнію. Водночас наявність у структурі включень карбіду кремнію і диборидів приводить, як правило, або до зміни напрямку поширення тріщини, тобто до її відхилення, або взагалі до її зупинки, що своєю чергою сприяє підвищенню енергії руйнування і, отже, тріщиностійкості композита. Проаналізовано особливості структуроутворення та встановлено механізм росту трифазової чотирикомпонентної евтектики в системі  $B4C-NbB2-SiC$ , відповідно до якого кристалізація трифазової евтектики ( $B4C+NbB2+SiC$ ) відбувається як безперервний сумісний ріст дендритних фаз, коли двофазова структурна складова ( $SiC+NbB2$ ) росте в кооперативному режимі, а третя фаза  $B4C$  синхронно росте в автономному. Побудовано просторову модель евтектичної комірки для системи  $B4C-NbB2-SiC$ .

2. The dissertation is devoted to the study of directionally crystallized alloys of the  $B4C-NbB2-SiC$  and  $B4C-TaB2-SiC$  systems, in particular to the study of their structure, phase composition, physical-mechanical and high-temperature properties, as well as regularities of structure formation of quasi-triple eutectic alloys. The author analyzes the properties of studied systems' components, considers the methods of obtaining directionally crystallized eutectic alloys, reviews double eutectic systems such as  $B4C-MeB2$ ,  $SiC-B4C$ , and  $SiC-MeB2$  and ternary eutectic systems  $B4C-MeB2-SiC$ . Features of structure formation in eutectic systems were considered, mechanical properties of directionally crystallized alloys were analyzed. The eutectic composition of alloys of the

B4C-NbB2-SiC and B4C-TaB2-SiC systems was determined by metallographic analysis: B4C-(15-20)NbB2-(33-40)SiC and B4C-(8-12)TaB2-(38-42)SiC (mol.%), respectively. Ternary eutectic composites B4C-NbB2-SiC and B4C-TaB2-SiC with a uniform fine structure along the entire sample were experimentally obtained. It is established that the eutectic structure of the B4C-NbB2-SiC system contains three phases: B4C, NbB2, SiC. The ternary eutectic (B4C-15NbB2-35SiC mol.%) has a lamellar structure in which boron carbide acts as a matrix evenly distributed throughout the volume inclusions of silicon carbide and niobium diboride. For composites in the transverse direction, there is a directed texture of phases of the NbB2 in the direction (100), SiC in the direction (111), and B4C in the direction (104). The most directional phase is the SiC phase in the direction (111), both in the longitudinal and in the transverse directions, for which the calculated Lotgering factor is in the range of 0.8-0.9. The structural components in the ternary eutectic have the following sizes: B4C - 4-6  $\mu\text{m}$ , NbB2 - 1-3  $\mu\text{m}$ , SiC - 2-3  $\mu\text{m}$ . The following mechanical properties of the eutectic composite B4C-15NbB2-35SiC were determined: Vickers hardness (35.8 GPa), fracture toughness under load 9.8 N (6.4 MPa·m<sup>1/2</sup>), Young's modulus by the impulse method (462 GPa), electrical conductivity (2.85-5.36×10<sup>4</sup> Cm/m); the coefficient of thermal expansion in the range of 22-1600 °C, flexural strength at the room temperature (220 MPa) and 1600 °C (395 MPa) were investigated. The structure of the ternary eutectic composite B4C-8TaB2-40SiC (mol.%) is a uniform ternary eutectic system B4C-TaB2-SiC of a lamellar type throughout the volume of the sample, in which boron carbide is the matrix, and SiC and TaB2 act as reinforcing phases. In general, the systems B4C-TaB2-SiC and B4C-NbB2-SiC have a similar eutectic structure. The X-ray phase analysis showed the presence of only the following phases: silicon carbide, boron carbide, and tantalum diboride; no other phases were detected. The correlation between the crystallization rate and the linear parameter of the eutectic structure was established. The following mechanical properties of the eutectic composite B4C-8TaB2-40SiC were determined: Vickers hardness (33-34 GPa), fracture toughness under a load of 9.8 N (3.9 MPa·m<sup>1/2</sup>), the coefficient of thermal expansion in the range of 22-1600 °C was investigated. The influence of crystallization rate on the structure and properties of the obtained composites has been investigated. Increasing the crystallization rate leads to a change in the morphology of inclusions from the plate-like one to more lamellar, as well as to a natural size reduction of the structural components. Experimental studies of micromechanical properties have shown that Vickers hardness and fracture toughness increase with increasing crystallization rate in both the longitudinal and transverse to the growth directions. The increase in hardness with increasing the rate of crystallization of the directionally crystallized alloys B4C-NbB2-SiC and B4C-TaB2-SiC occurs similarly to the Hall-Patch rule. The analysis of crack propagation after indentation showed that the crack most easily passes through the areas of the matrix phase of boron carbide or silicon carbide inclusions. However, the presence of silicon carbide and diborides inclusions in the structure leads either to a change in the direction of motion, ie deviation of the crack, or to its cessation in general, which, in turn, increases the fracture energy and, consequently, fracture toughness of the composite. Peculiarities of structure formation were analyzed and the mechanism of growth of the ternary four-component eutectic in the B4C-NbB2-SiC system was established. According to this mechanism, crystallization of ternary eutectic (B4C-NbB2-SiC) occurs as continuous compatible growth of dendritic phases, while the two-phase structural component (SiC-NbB2) increases in the cooperative mode, and the third phase B4C grows synchronously in the autonomous mode. A spatial model of an eutectic cell for the B4C-NbB2-SiC system was constructed.

**Державний реєстраційний номер ДіР:**

**Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки:**

**Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності:**

**Підсумки дослідження:**

**Публікації:**

**Наукова (науково-технічна) продукція:**

**Соціально-економічна спрямованість:**

**Охоронні документи на ОПВ:**

**Впровадження результатів дисертації:**

**Зв'язок з науковими темами:**

## **VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Богомол Юрій Іванович

2. Bohomol Yurii Ivanovych

**Кваліфікація:** д. т. н., 05.16.06

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:**

**Код за ЄДРПОУ:**

**Місцезнаходження:**

**Форма власності:**

**Сфера управління:**

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

## **VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів**

**Офіційні опоненти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Попов Олексій Юрійович

2. Popov Oleksii Yu.

**Кваліфікація:** д. ф.-м. н., 01.04.07

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:**

**Код за ЄДРПОУ:**

**Місцезнаходження:**

**Форма власності:**

**Сфера управління:**

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Згалат-Лозинський Остап Броніславович
2. Zgalat-Lozynskyy Ostar B.

**Кваліфікація:** д. т. н., 05.16.06**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується**Додаткова інформація:****Повне найменування юридичної особи:****Код за ЄДРПОУ:****Місцезнаходження:****Форма власності:****Сфера управління:****Ідентифікатор ROR:** Не застосовується**Рецензенти****Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Степанчук Анатолій Миколайович
2. Stepanchuk Anatoliy M.

**Кваліфікація:** к.т.н., 05.16.06**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується**Додаткова інформація:****Повне найменування юридичної особи:****Код за ЄДРПОУ:****Місцезнаходження:****Форма власності:****Сфера управління:****Ідентифікатор ROR:** Не застосовується**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Мініцький Анатолій Вячеславович
2. Minitsky Anatoliy V.

**Кваліфікація:** д. т. н., 05.16.06**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується**Додаткова інформація:****Повне найменування юридичної особи:****Код за ЄДРПОУ:****Місцезнаходження:**

**Форма власності:**

**Сфера управління:**

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

## **VIII. Заключні відомості**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
голови ради**

Карпець Мирослав Васильович

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
головуючого на засіданні**

Карпець Мирослав Васильович

**Відповідальний за підготовку  
облікових документів**

**Реєстратор**

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є  
відповідальним за реєстрацію наукової  
діяльності**



Юрченко Т.А.