

УДК 621.762

**І.Ю. Троснікова***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ СПРЯМОВАНО АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМ Mo-Si-B, WC-W<sub>2</sub>C**

*У статті розглянуто закономірності формування структури та властивостей керамічних матеріалів з підвищеною міцністю для ефективної роботи в екстремальних умовах – великих динамічних навантажень, абразивного зношування в агресивному середовищі та при високих температурах. Розроблено фізико-хімічні основи отримання керамічних матеріалів, що полягають в контрольованому керуванні структурою під час спрямованої кристалізації евтектичних сплавів систем Mo-Si-B, WC-W<sub>2</sub>C.*

*Ключові слова:* спрямована кристалізація, армування, евтектичні сплави, керамічні матеріали, швидкість охолодження.

**И.Ю. Тросникова***Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»***ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАПРАВЛЕННО АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМ Mo-Si-B, WC-W<sub>2</sub>C**

*В статье рассмотрены закономерности формирования структуры и свойств керамических материалов с повышенной прочностью для эффективной работы в экстремальных условиях - больших динамических нагрузках, абразивного износа в агрессивной среде и при высоких температурах. Разработаны физико-химические основы получения керамических материалов, состоящие в контролируемом управлении структурой при направленной кристаллизации евтектических сплавов систем Mo-Si-B, WC-W<sub>2</sub>C.*

*Ключевые слова:* направленная кристаллизация, армирование, евтектические сплавы, керамические материалы, скорость охлаждения.

**I.Yu. Trosnikova***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***THE BASICS OF FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES THE REINFORCED COMPOSITE MATERIALS OF SYSTEMS OF Mo-Si-B, WC-W<sub>2</sub>C**

*The article considers the patterns of formation of the structure and properties of ceramic materials with increased strength and hardness for efficient work in extreme conditions - large dynamic loads, abrasive wear in aggressive media and at high temperatures. Physical and chemical bases for obtaining ceramic materials consisting of control of the structure with directed crystallization of eutectic alloys of systems of Mo-Si-B and WC-W<sub>2</sub>C were developed.*

*Keywords:* directional crystallization, reinforcement, eutectic alloys, ceramic materials, cooling rate.

**Постановка проблеми.** Науково-технічний прогрес на сьогоднішній день базується на створенні нових матеріалів, здатних витримувати все вищі термічні та механічні навантаження в найбільш екстремальних умовах. Тому все більше уваги приділяється застосуванню керамічних матеріалів, які мають комплекс підвищених фізико-механічних властивостей, особливо в області високих динамічних навантажень, підвищених температур та агресивних середовищ.

Деталі, що працюють в умовах великих динамічних навантажень, абразивного зношування, в агресивному середовищі та при високих температурах, наприклад, бури нафто- та гірничовидобувного обладнання, металообробного інструменту, лопатки газотурбінних двигунів та інші мають строк служби в 3-5 разів нижчий, аніж інші частини механізмів цієї техніки [1]. Проблему підвищення зносостійкості можна вирішити шляхом виготовлення конструкційних деталей машин і механізмів із нових матеріалів з підвищеними твердістю, міцністю та в'язкістю, або модифікуванням поверхні традиційних шляхом нанесення зносостійких покриттів [2].

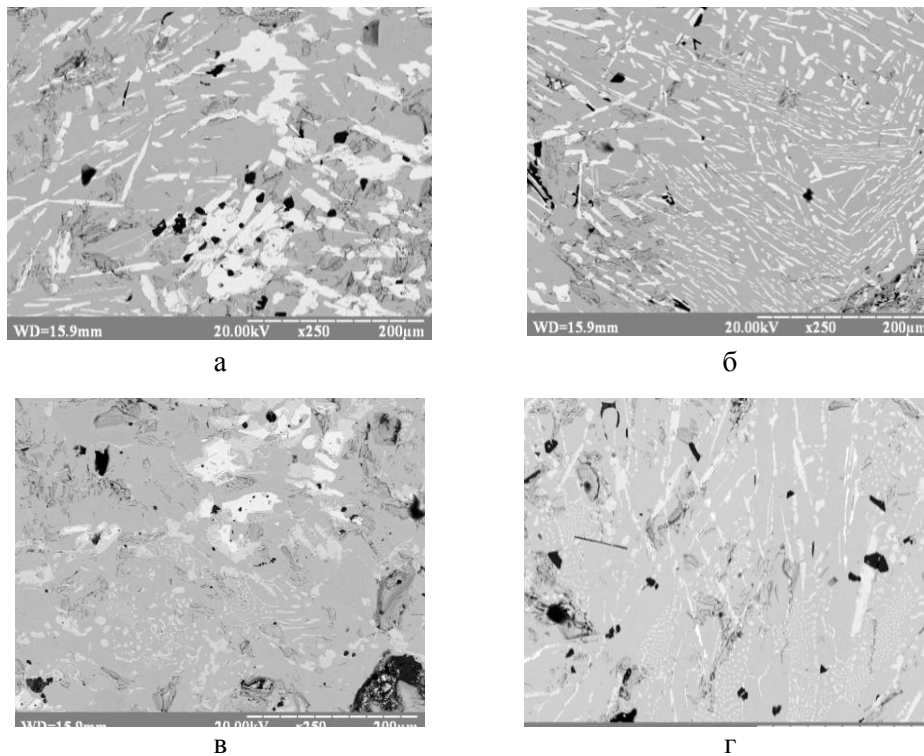
Керамічні матеріали мають найбільш високі значення температури плавлення, модуля пружності, температури початку інтенсивної повзучості, твердості. Серед перспективних для виготовлення деталей газотурбінних двигунів є сплави системи Mo-Si-B, а серед традиційних для захисту металевих виробів від зношування сплави системи WC-W<sub>2</sub>C. Головним недоліком керамічних матеріалів є низька міцність та висока крихкість. З усіх механізмів зміцнення (подрібнення зерна, армування волокнами, введення пластичної зв'язки, створення внутрішніх напружень та інше) тільки армування монокристалічними волокнами забезпечує збільшення міцності більше ніж на порядок [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одержання армованих керамічних матеріалів змішуванням порошків матричної фази та волокон з наступним спіканням, гарячим пресуванням, ізостатичним пресуванням не дозволяє зберегти цілісність і рівномірний розподіл волокон по об'єму матричної фази [4-6]. Методи кристалізації із розплавів евтектичних сплавів дозволяють отримувати регулярне розташування волокон та формування когерентних та напівкогерентних границь розподілу між матричною фазою і волокнами, що є головною умовою підвищення термічної стабільності структури та поліпшення фізико-механічних властивостей матеріалу. Водночас ступінь когерентності, рівномірність розподілу за розмірами, розмір волокон залежить від теплових умов кристалізації, хімічного складу та природи фазових складових композиційного матеріалу.

**Постановка завдань.** Метою роботи є дослідження впливу параметрів процесу кристалізації та природи компонентів на мікроструктуру сплавів систем  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$ ,  $\text{WC-W}_2\text{C}$  з метою підвищення їх механічної міцності та зносостійкості.

**Викладення основного матеріалу.** Для вивчення процесу сплавоутворення у квазібінарній системі  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$  вихідні компоненти отримували у вигляді порошків прямим синтезом із елементів. Вивчався хімічний, фазовий склад та фізичні властивості порошків. Встановлено, що частинки з розміром 5-10 мкм порошку  $\text{MoB}_2$  мають сферичну, а  $\text{MoSi}_2$  більш неправильну форми.

Зі збільшенням швидкості кристалізації кристалів евтектичного сплаву системи  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$  розмір включень із дибориду молібдену зростає в поздовжньому напрямку і зменшується в площині поперечного перетину кристалу. Крім того, збільшується кількість включень боридної фази, що свідчить про формування стрижнів та пластин, які забезпечують ефект армування матричної фази із дисиліциду молібдену (рис. 1).



**Рис. 1.** Мікроструктура поперечного (а, в) та поздовжнього (б, г) перетину евтектичного сплаву ( $8 \text{ MoSi}_2\text{-}18\text{ MoB}_2$ ) – 1%(мас.)Si системи  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$  - швидкість кристалізації 2 мм/хв. (а,б) і 4мм/хв (в,г)

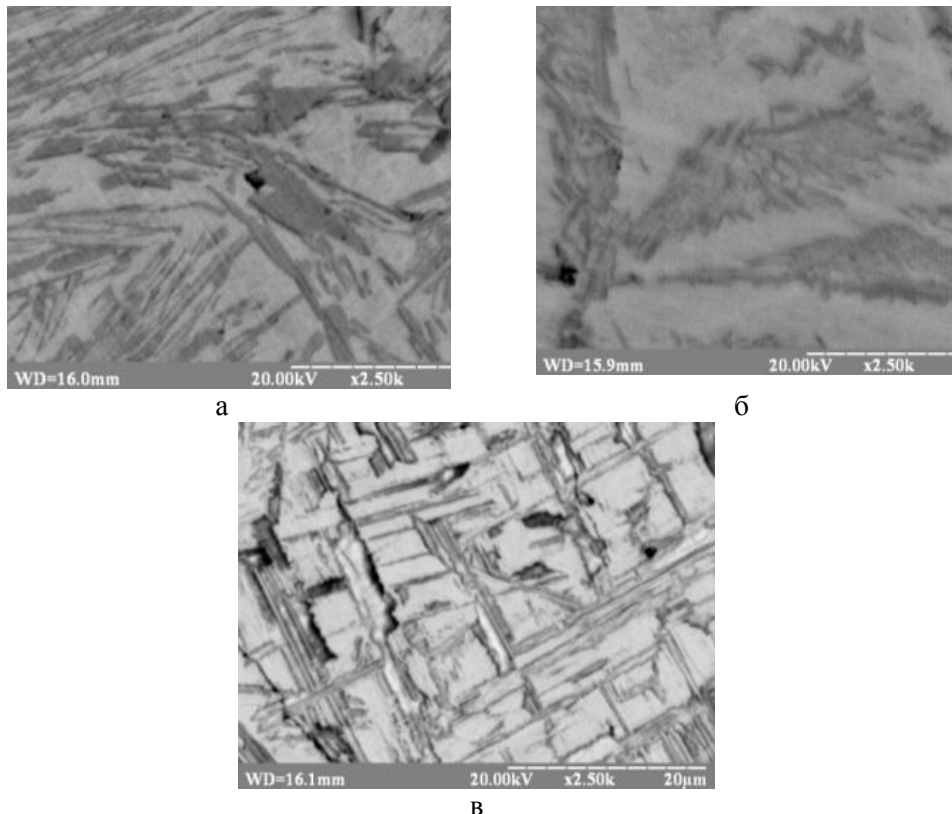
Вимірювання механічних властивостей кристалів евтектичного сплаву показало, що зі збільшенням швидкості кристалізації від 1 до 4 мм/хв. мікромеханічні характеристики сплаву зростають в 1,5-2 рази, як у площині поперечного, так і в поздовжньому перерізі кристалу, що можна пояснити ефектом армування бездефектними монокристалічними волокнами з дибориду молібдену матричної фази з дисиліциду молібдену.

На основі вивчення структури, температури плавлення, фазового складу встановлено евтектичний характер діаграми стану квазібінарної системи  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$ , склад евтектики – 82 мас.% $\text{MoSi}_2$  - 18 мас.% $\text{MoB}_2$  та температура плавлення – 1650 °С.

Закономірності формування структури при спрямованій кристалізації розплаву квазібінарного евтектичного сплаву системи  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$  полягають у тому, що вирощені в умовах спрямованої кристалізації кристали евтектичного сплаву представляють собою матрицю із  $\text{MoSi}_2$  з регулярно розташованими волокнами із  $\text{MoB}_2$ , розмір яких зменшується, а кількість зростає при збільшенні швидкості росту кристалів від 1 до 4 мм/хв.

Виявлено, що кристали евтектичного сплаву системи  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$  з матрицею з  $\text{MoSi}_2$  та регулярно розташованими стрижневими включеннями з  $\text{MoB}_2$  мають на порядок нижчу швидкість високотемпературної повзучості, порівняно зі сплавами з хаотичним розташуванням фазових складових і є найбільш перспективними для виготовлення деталей газотурбінних двигунів.

Сплави системи  $\text{WC-W}_2\text{C}$  широко використовують на практиці як наплавочні матеріали для деталей, що працюють в умовах великих динамічних навантажень [2]. Суттєвого підвищення їх механічних властивостей можна досягти за рахунок армування [7], утім спроба отримати армований композит в системі  $\text{WC-W}_2\text{C}$  в умовах зонної плавки, аналогічно системі  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$  з максимально можливою швидкістю охолодження  $10^2$  град/с виявилася не можливою. Тому вплив швидкості охолодження на формування структури та властивостей евтектичного сплаву системи  $\text{WC-W}_2\text{C}$  –  $\text{WC-78}\div\text{82}\%$ (мас.) $\text{W}_2\text{C}$  (реліту) вивчали на сплавах, отриманих в умовах відцентрового розпилення розплаву евтектичного складу системи  $\text{WC-W}_2\text{C}$ , де реалізується швидкість охолодження  $10^5$  град/с (рис.2).



а -  $10^2$  град/с; б –  $10^3$  град/с; в -  $10^5$  град/с

**Рис. 2. Мікроструктура сплаву системи  $\text{WC-W}_2\text{C}$ , отриманого з різною швидкістю охолодження**

Як видно з рисунку 2 зі зростанням швидкості охолодження від  $10^2$  до  $10^3$  град/с видовжені пластини та стрижні змінюють свою морфологію на дендритну з гілками 1 та 2 порядку, а при максимальній швидкості охолодження ( $10^5$  град/с) формується комірчаста структура, де наявні дендрити тільки 1 порядку. Такий процес формування структури свідчить про те, що зі зростанням швидкості кристалізації збільшується концентраційне переохолодження в розплаві на фронті росту кристалу.

Методами рентгеноструктурного аналізу встановлено вплив швидкості охолодження на фазовий склад, розмір та напружено-деформований стан фазових складових та властивості

евтектичного сплаву системи WC-W<sub>2</sub>C [8]. Виявлено, що з підвищенням швидкості охолодження співвідношення WC та W<sub>2</sub>C практично не змінюється, розміри областей когерентного розсіювання зменшуються у 1,5–2 рази, напруження як у матриці, так і у включеннях зростають в 2–2,5 рази, при чому армуюча фаза WC знаходиться в сплавах у розтягнутому, а матрична фаза W<sub>2</sub>C — у стиснутому стані, що призводить до підвищення мікротвердості на 30%, в 2–4 рази міцності на стиснення та на 30–40% зносостійкості.

**Висновки.** У роботі встановлено закономірності формування структури та властивостей при спрямованій кристалізації розплаву квазібінарного евтектичного сплаву системи MoSi<sub>2</sub>-MoB<sub>2</sub>, а також евтектичного сплаву системи WC-W<sub>2</sub>C в умовах охолодження зі швидкістю від 10<sup>2</sup> до 10<sup>5</sup> град/с.

#### Список використаних джерел:

1. Белый А.И. Износоустойчивость и прочность карбидов вольфрама WC - W<sub>2</sub>C, полученных разными методами // Автоматическая сварка. – 2010. – № 12. – С. 20 – 23.
2. Дзыкович В.И. Свойства порошков карбидов вольфрама, полученных по различным технологиям // Автоматическая сварка. – 2010. – № 4. – С. 28 – 31.
3. Лобода П.І. Фізико-хімічні основи створення нових боридних матеріалів для електронної техніки і розробка керамічних катодних вузлів з підвищеною ефективністю // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. – 2004.
4. Лобода П.І. Спрямовано закристалізовані бориди. – К.: Праймдрук, 2012. – 395 с.
5. Jain P., Kumar K.S. Dissolved Si in Mo and its effects on the properties of Mo–Si–B alloys, Scripta Materialia, Volume 62, Issue 1, 2010, Pages 1-4.
6. Hasemann G., Bogomol I., Schliephake D., Loboda P.I., Krüger M. Microstructure and creep properties of a near-eutectic directionally solidified multiphase Mo–Si–B alloy, Intermetallics, Volume 48, 2014, Pages 28-33.
7. I. Bogomol, O. Vasykiv, Y. Sakka and P. Loboda. Mechanism of nucleation and growth of directionally crystallized alloys of the B<sub>4</sub>C–MeB<sub>2</sub> system // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – № 490 (1-2). – P. 557-561.
8. Троснікова І.Ю., Лобода П.І., О.П. Карасєвська О.П., Білий О.І. Вплив швидкості охолодження під час кристалізації розплаву на структуру та властивості WC-W<sub>2</sub>C // Порошкова металургія. – 2013. - № 11/12 . – С. 80-87.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2018