

## **Фізика високотемпературної міцності армованих керамічних матеріалів спеціального, функціонального і біомедичного призначення**

### **Физика высокотемпературной прочности армированных керамических материалов специального, функционального и биомедицинского назначения**

#### **Physics of high-temperature strength of reinforced ceramic materials of special, functional and biomedical purposes**

- 1. Номер державної реєстрації теми - 0116U003737**
- 2. Науковий керівник – к.т.н., доц. Богомол Ю.І., Богомол Ю.І., Bogomol Iu.I.**

#### **3. Суть розробки, основні результати.**

**(укр.)**

Встановлено основні закономірності фізичної природи міцності спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів ( $\text{LaB}_6\text{-MeB}_2$ ,  $\text{V}_4\text{C-MeB}_2$ ,  $\text{Ti-TiB}$ ,  $\text{Mo-Si-B}$ , тощо) шляхом системних досліджень впливу природи матричної та армуючої фаз, їх структурно-геометричних характеристик та напружено-деформованого стану на температурну залежність механічних характеристик композиційних матеріалів. На основі експериментальних даних проаналізовано ефективну енергію активації зародження і росту включень армуючої фази при кристалізації евтектичних сплавів квазібінарних боридних, карбідних і оксидних систем. Доведено, що концентраційна складова переохолодження має найбільший вплив на зародження і ріст фаз в евтектичних сплавах досліджених систем. Встановлено механізми зміцнення спрямовано армованих композитів в широкому інтервалі температур – від кімнатної до 2000 °С. Доведено, що проведення додаткової термічної обробки армованих керамічних композитів сприяє зниженню величини внутрішніх напружень і, як наслідок, підвищенню їх механічних характеристик. Показано, що міцність на згин спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів немонотонно змінюється по мірі зростання температури випробувань в інтервалі 25-2000 °С. Встановлено, що підвищення міцності таких композитів у високотемпературному інтервалі обумовлене змінами у напружено-деформованому стані, зростанням пластичності фазових складових по мірі збільшення температури випробувань та реалізацією механізмів зернограничного (на поверхні розділу армуючої фази - матриця) та деформаційного зміцнення монокристалічних волокон диборидів перехідних металів. Розроблені нові спрямовано армовані композити в системі  $\text{V}_4\text{C-TiB}_2\text{-SiC}$ , міцність на згин яких при 2000 °С досягає 370 МПа. Одержані матеріали можуть бути успішно застосовані для спеціального, функціонального і біомедичного призначення.

**(рос.)**

Установлены основные закономерности физической природы прочности направленно закристаллизованных эвтектических сплавов ( $\text{LaB}_6\text{-MeB}_2$ ,  $\text{V}_4\text{C-MeB}_2$ ,  $\text{Ti-TiB}$ ,  $\text{Mo-Si-B}$  и т.д.) путем системных исследований влияния природы матричной и армирующей фаз, их структурно-геометрических характеристик и напряженно-деформированного состояния на температурную зависимость механических характеристик композиционных материалов. На основе экспериментальных данных проанализирована эффективная энергия активации зарождения и роста включений армирующей фазы при кристаллизации эвтектических сплавов квазибинарных боридных, карбидных и оксидных систем. Доказано, что концентрационная составляющая переохлаждения имеет наибольшее влияние на зарождение и рост фаз в эвтектических сплавах исследованных систем. Установлены механизмы упрочнения направленно армированных композитов в широком интервале температур – от комнатной до 2000 °С. Доказано, что проведение дополнительной термической обработки армированных керамических композитов способствует снижению величины внутренних напряжений и, как следствие, повышению их механических характеристик. Показано, что прочность на изгиб направленно закристаллизованных эвтектических сплавов немонотонно меняется по мере роста температуры испытаний в интервале 25-2000 °С. Установлено, что повышение прочности таких композитов в высокотемпературном интервале обусловлено изменениями в напряженно-деформированном состоянии, ростом пластичности фазовых составляющих по мере увеличения

температуры испытаний и реализацией механизмов зернограничного (на поверхности раздела армирующая фаза - матрица) и деформационного упрочнения монокристаллических волокон диборидов переходных металлов. Разработаны новые направлено армированные композиты в системе  $V_4C-TiB_2-SiC$ , прочность на изгиб которых при 2000 °C достигает 370 МПа. Полученные материалы могут быть успешно применены для специального, функционального и биомедицинского назначения.

(англ.)

The basic regularities of the physical nature of strength of directionally solidified eutectic alloys ( $LaB_6-MeB_2$ ,  $V_4C-MeB_2$ ,  $Ti-TiB$ ,  $Mo-Si-B$ , etc.) have been defined by systematic studies of the influence of the nature of the matrix and reinforcing phases, their structural-geometric characteristics, and stress-strain state on the temperature dependence of mechanical characteristics of composite materials. The effective activation energy of the nucleation and growth of inclusions of the reinforcing phase during the crystallization of eutectic alloys of quasibinary boride, carbide and oxide systems is analyzed on the base of experimental data. It has been proved that the concentration component of supercooling has the greatest influence on the nucleation and growth of phases in eutectic alloys of the studied systems. The strengthening mechanisms of directionally reinforced composites in a wide range of temperatures - from room to 2000 °C are established. It is proved that carrying out of additional heat treatment of reinforced ceramic composites leads to decrease of the value of internal stresses and, consequently, increase their mechanical characteristics. It is shown that the bending strength of directionally solidified eutectic alloys does not change monotonically with increasing of the testing temperature in the range of 25-2000 °C. It was established that the increase of the strength of such composites in the high-temperature interval is due to the growth of the plasticity of the phase components as the testing temperature is increased and the mechanism of grain boundary (on the interface of the reinforcing phase - matrix) and the strain hardening of the monocrystalline fibers of transition metals diborides. The new directionally reinforced composites are developed in the system  $V_4C-TiB_2-SiC$ , bending strength of which at 2000 °C reaches 370 МПа. The obtained materials can be successfully applied for special, functional and biomedical purposes.

#### **4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.**

- Патент на корисну модель № 114502 Спосіб отримання керамічного бронематеріалу на основі карбіду бору та дибориду титану Автори: Лобода П.І., Солодкий Є.В., Троснікова І.Ю., Богомол Ю.І. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.03.2017.
- Заявка на видачу патенту на винахід № а 2017 12753 Композиційна армована кераміка на основі карбіду бора та спосіб її отримання Лобода П.І., Богомол Ю.І., Солодкий Є.В., Троснікова І.Ю. Дата подання 22.10.2017.
- Заявка на видачу патенту на корисну модель № и 2018 06248 Високотемпературний композиційний сплав на основі карбіду бору Богомол Ю.І., Абдуллаєва Е.Р., Солодкий Є.В., Упатов М.І. Дата подання 04.06.2018.

#### **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Результати відповідають світовому рівню, а підходи до керування структурними параметрами керамічних спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів не мають аналогів у світі.

#### **6. Економічна привабливість для просування на ринок.**

Застосування нових армованих керамічних і металокерамічних матеріалів дає можливість підвищити робочі температури високотемпературних пристроїв і механізмів: газотурбінних і рідинних апогейних двигунів, кромки повітрязбірників ПВРД, тощо.

#### **7. Потенційні користувачі.**

Матеріали одержані при виконанні НДР запропоновано для реалізації в промисловому виробництві підприємствам України (ПАТ "Меридіан", ДП ВО "Південмаш", ТОВ НВП "Топаз-технологія"; ТОВ "Технології високих енергій"; корпорація «УкрІннМаш») та закордонним

виробникам і споживачам продукції, яка виготовляється із тугоплавких сполук, металокерамічних та керамічних композиційних матеріалів.

#### **8. Стан готовності розробки**

Розроблені матеріали для корпусу камери рідинного апогейного двигуна (робочі температури 1600-1700 °С), кромки повітрярозбірника ПВРД (робочі температури 1200°С).

#### **9. Існуючі результати впровадження.**

Розроблені керамічні та металокерамічні армовані матеріали були випробувані на ДП «КБ «Південне») та ТОВ НВП "Топаз-технологія" і показали свою перспективність для виготовлення високотемпературних деталей в авіакосмічній галузі.

#### **10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.**

КПІ ім. Ігоря Сікорського, інженерно-фізичний факультет, кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, тел. (044) 204-82-15, [decan@iff.kpi.ua](mailto:decan@iff.kpi.ua)

#### **11. Фото розробки**



Кромка повітрярозбірника ПВРД.



Деталь камери згорання апогейного рідинного двигуна.

#### **12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки.**

1. G. Hasemann, D. Kaplunenko, I. Bogomol, M. Kruger Near-Eutectic Ternary Mo-Si-B Alloys: Microstructures and Creep Properties / JOM (2016) Volume 68, Issue 11, P. 2847–2853.
2. I. Solodkyi, I. Bogomol, P. Loboda, D. Batalu, A.M. Vlaicu and P. Badica Floating zone partial re-melting of B<sub>4</sub>C infiltrated with molten Si, Ceramics International, 43 (2017) 14718–14725.
3. S.N. Dub, S.M. Sichkar, V. Bilous, G.N. Tolmachova, P.I Loboda, I. Bogomol, G.P. Kysla Mechanical properties of single crystals of transition metals diborides TMB<sub>2</sub> (TM = Sc, Hf, Zr,

- Ti). Experiment and theory // *Journal of Superhard Materials* 39(5):308-318 · September 2017. DOI: 10.3103/S1063457617050021
4. Bolbut Volodymyr, Bogomol Iurii, Bauer Carolin, Krüger Manja Directionally solidified Mo-Zr-B alloys // *Material Science and Engineering Technology*, 48, 2017, P. 1113–1124.
  5. T.O.Soloviova, O.P.Karasevska, J.Vleugels, P.I.Loboda Influence of annealing on crucible-free float zone melted LaB<sub>6</sub>-TiB<sub>2</sub> composites *Journal of Alloys and Compounds* Volume 729, 2017, Pages 749-757.
  6. Bolbut Volodymyr, Bogomol Iurii, P. Loboda, Krüger Manja Microstructure and mechanical properties of a directionally solidified Mo-12Hf-24B alloy // *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 735, 2018, Pages 2324–2330.
  7. Jiamin Z, Degui Z, Haiwen Z, Bogomol I, Grasso S, Hu C. Microstructure and indentation damage resistance of ZrB<sub>2</sub>-20 vol.%SiC ipo-eutectic composites. *International Journal of Applied Ceramic Technology* Vol.15, Iss.3, 2018, P. 619-624.
  8. Akimov, G.Y., Soloviova, T.A., Loboda, P.I., S. Yu. Prilipko Mechanical activation of crystallization of amorphous boron and synthesis of Al<sub>3</sub>Ti under cold isostatic pressing of B–Al–(LaB<sub>6</sub>–TiB<sub>2</sub>) powder. *Journal of Superhard Materials* 39 (5) 2017 P. 343-48.
  9. Syzonenko, O.M., Loboda, P.I., Zaichenko, A.D., Ye. V. Solodkyi, A. S. Torpakov, M. S. Prystash, V. O. Trehub The influence of high-voltage electrical discharge on dispersion and structure of B<sub>4</sub>C powder , *J. Superhard Mater.* (2017) 39: 243.
  10. I.V. Solodkyi, I. Bogomol, M.Ya. Vterkovs'kyi, P.I. Loboda Low-Temperature Synthesis of Boron Carbide Ceramics // *Journal of Superhard Materials* 40(4) 2018. P. 236-242.
  11. Husarova, I.O., Potapov, O.M., Solodkyi, I.V., >Bogomol, Iu.I.< Production and Properties of B<sub>4</sub>C–TiB<sub>2</sub> Composites with Isotropic Eutectic Microstructure, *Powder Metall Met Ceram* (2018) 57: 209-214.
  12. Hasan Gocmez, Mustafa Tuncer, >Iurii Bogomol< Spark plasma sintering of ZrB<sub>2</sub> powders synthesized by citrate gel method, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Volume 78, 2019, Pages 127-130.
  13. I.Solodkyi, O.Bezdorozhev, M.Vterkovskiy, I.Bogomol, V.Bolbut, M.Krüger, P.Badica, >P.Loboda< Addition of Carbon fibers into B<sub>4</sub>C infiltrated with molten silicon *Ceramics International*, Volume 45, Issue 1, January 2019, Pages 168-174.
  14. P.I. Loboda Structure and Properties of Reinforced Ceramic Materials Produced by Directional Solidification // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2018, Volume 57, Issue 1–2, pp 13–26.
  15. P. I. Loboda, O. P. Karasevska, and T. O. Soloviova, Mode of Deformation of Phase Components of a Ceramic Composite LaB<sub>6</sub>–TiB<sub>2</sub>, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 38, No. 9: 1249–1263 (2016).
  16. Григоренко Г.М., Ахонин С.В., Лобода П.И., Григоренко С.Г., Северин А.Ю., Березос В.А., Богомол Ю.И. Структура и свойства титанового сплава, легированного бором, полученного способом электронно-лучевого переплава / *Современная электрометаллургия*, – № 1, 2016. – С. 21-25.
  17. Богомол Ю.И., Попович О.И., Хаземан Г., Крюгер М., Лобода П.И. Структура та властивості спрямовано закристалізованого сплаву системи Мо-8,7Si-18В / *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. – №2. – 2016. – С. 69-76.
  18. Степанов О.В., Богомол Ю.И. Програмні засоби оптимального вибору матеріалів / *Металознавство та обробка металів*. – № 4. – 2016. – С. 56-60.
  19. V. Bolbut, I. Bogomol, M. Krüger Gerichtet erstarrte Mo-Zr-B- und Mo-Hf-B-Legierungen, 16. Sommerkurs Werkstoffe und Fügen am Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 08. und 09. September 2017 P. 179-184. (ISBN 978-3-944722-58-0; DOI 10.24352/UB.OVGU-2017-75).
  20. Упатов М.И., Богомол Ю.И., Болбут В.В., Лобода П.И. Вплив перемішування розплаву на структуру та властивості спрямовано закристалізованого сплаву Мо-17,5Si-8В / *Металознавство та обробка металів*. – № 1. – 2018. – С. 22-29.

21. Лобода П.И., Зворыкин Л.О., Косюк В.С., Солодкий Е.В. Анализ перспектив создания титана, армированного волокнами диборида титана, устойчивого к динамическим нагрузкам, Технологические системы, №2, С. 89-91, 2016.
  22. Лобода П.И., Зворыкин Л.О., Новиков М.О., Солодкий Е.В. Особенности изменений структуры и свойств в сплаве Т110 в результате ударной механической нагрузки, Технологические системы, №2, С. 79-81, 2016.
  23. Троснікова І.Ю., Лобода П.І., Івашура О.О. Вплив хімічного складу на структуру та механічні властивості сплавів системи Nb-Si-B // Металознавство та обробка металів №4, 2016, с. 31-35.
  24. Троснікова І.Ю. Закономірності формування структури та властивостей спрямовано армованих композиційних матеріалів систем Mo-Si-B, WC-W<sub>2</sub>C // Наукові нотатки. – 2018. – № 63. – С.226-229.
  25. Троснікова І.Ю. Вплив легування молібденом на фізико-механічні властивості евтектичного сплаву системи WC-W<sub>2</sub>C // Проблеми тертя та зношування. – 2018. – №3(80). – С.56-61.
  26. Нанотехнології у зварюванні низьколегованих високоміцних сталей : монографія / В.В. Головка, В.Д. Кузнецов, С.К. Фомічов, П.І. Лобода. – Київ: НТУУ «КПІ» Видавництво «політехніка», 2016. – 240 с.
  27. Створення та впровадження нового класу евтектичних композиційних матеріалів в інноваційні технології підприємств машинобудування / В.Є. Панарін, М.В. Кіндрачук, П.І. Лобода, В.А. Тітов, Л.Й. Іщенко, В.М. Меркулов, В.Ю. Коцюба, Т.С. Черепова. – Запоріжжя, вид. АТ «Мотор січ», 2016. – 262 с.
  28. Степанчук А.М., Білик І.І. Матеріали для напилювання покриттів: Навчальний посібник. – К.: Центр учбової літератури, 2016. – 249 с.
  29. Бірюкович Л. О. Кристалохімія тугоплавких сполук: навч. посіб. / Л. О. Бірюкович. – К.: Центр учбової літератури, 2016. – 112 с.
  30. П. І. Лобода, О.П. Карасєвська, І.Ю. Троснікова Рентгеноструктурний аналіз матеріалів у дисперсному стані» Навчальний посібник, К. вид. «Центр учбової літератури», 2017, 139 с.
  31. Г.П. Кисла, П.І. Лобода, В.Є.Федорчук, М.О. Сисоєв Матеріалознавство тугоплавких металів та сполук. Посібник. – Київ: «Центр учбової літератури», 2017. – 320с.
  32. І.П. Фесенко, В.З. Туркевич, В.І. Часник, М.М. Прокопів, І.А. Петруша, Т.О. Пріхна, О.М. Кайдаш, О.О. Бочечка, Н.В. Сергієнко, Т.Б. Сербенюк, В.Є. Мошіль, О.В. Харченко, В.Б. Свердун, В.І. Лавріненко, С.В. Ткач, О.С. Осіпов, В.В. Івженко, О.П. Подоба, А.А. Марченко, М.П. Гадзира, Н.К. Давидчук, Г.С. Олійник, О.Б. Згалат-Лозинський, А.В. Букетов, Ю.М. Туз, Г.П. Кисла, Ю.О. Струніна, В.В. Стрельчук, О.Ф. Коломис, Я.О. Подоба, Л.В. Відута, В.Б. Нечитайло, Е.С. Геворкян Теплопровідність надтвердих матеріалів: Теоретична оцінка. Експериментальне визначення. Довідник. – Корсунь-Шевченківський: ФОП Майдаченко І.В., 2018. – 28с.
  33. І.П. Фесенко, В.З. Туркевич, В.І. Часник, М.М. Прокопів, І.А. Петруша, Т.О. Пріхна, О.М. Кайдаш, О.О. Бочечка, Н.В. Сергієнко, Т.Б. Сербенюк, В.Є. Мошіль, О.В. Харченко, В.Б. Свердун, В.І. Лавріненко, В.М. Ткач, О.С. Осіпов, В.В. Івженко, О.П. Подоба, А.А. Марченко, М.П. Гадзира, Н.К. Давидчук, Г.С. Олійник, О.Б. Згалат-Лозинський, А.В. Букетов, Ю.М. Туз, Г.П. Кисла, Ю.О. Струніна, В.В. Стрельчук, О.Ф. Коломис, Я.О. Подоба, Л.В. Відута, В.Б. Нечитайло, Е.С. Геворкян, Д.В. Часник, Я.В. Мартинюк Теплопровідність надтвердих матеріалів. Довідник. – Корсунь-Шевченківський: ФОП Майдаченко І.В., 2018, 2-е вид. – 68с.
- 13. Надати ключові слова до розробки: ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА КЕРАМІКА, ШВИДКІСТЬ ОХОЛОДЖЕННЯ, СПРЯМОВАНА КРИСТАЛІЗАЦІЯ, АРМОВАНІ МАТЕРІАЛИ, ЕВТЕКТИКА, ЗОННА ПЛАВКА.**