

Фізичні основи створення каркасних металокерамічних композитів із субмікронним зерном для забезпечення екстремально високих балістичних характеристик

Physical bases of creation of frame metal-ceramic composites with submicron grain for maintenance of extremely high ballistic characteristics

1. **Номер державної реєстрації – 0121U109789.**
2. **Науковий керівник** д.т.н., професор Юркова О.І.; Dr. Sc., Professor, Yurkova A.I.
3. **Суть розробки, основні результати.**

(укр.)

На підставі результатів досліджень із застосуванням комплексу сучасних методів фізичного матеріалознавства вперше розвинуті наукові уявлення щодо закономірностей формування структури, фазового складу та фізико-механічних властивостей каркасних металокерамічних композитів на основі карбіду вольфраму з багатокомпонентною зв'язкою з високоентропійного сплаву (ВЕС) під час швидкісного електронно-променевого та індукційного спікання, які будуть відігравати важливу роль у поглибленні уявлень щодо процесів формування структури в дисперсних гетерогенних системах.

Встановлено закономірності впливу вмісту ВЕС зв'язки, часу змішування порошкової суміші вихідних компонентів, технологічних параметрів спікання на ущільнення, формування структури, фазового складу, розміру зерен WC та фізико-механічних властивостей каркасних металокерамічних композитів балістичного призначення, отриманих з порошків WC та ВЕС в умовах високошвидкісного електронно-променевого та індукційного нагрівання. Вперше з'ясовано закономірності процесу термодинамічної, кінетичної, хімічної взаємодії між матеріалом каркасу (WC) та матричної фази (ВЕС) об'ємно армованого композиту та її вплив на структуру та властивості каркасних металокерамічних композиційних матеріалів та встановлено коефіцієнт термічного розширення та теплопровідність каркасних металокерамічних композитів WC–ВЕС.

Науково обґрунтовані основи керування фазовим складом, структурою, рівнем характеристик міцності порошкових композиційних сплавів WC–ВЕС за рахунок оптимізації їх складу, способу та технологічних параметрів їх консолідації. Це дозволяє розвинути концептуально нові підходи щодо створення високоміцних композитів. Обґрунтовані умови отримання високоміцних станів каркасних металокерамічних композитів WC–ВЕС, суттєво розвинуті фізичні основи їх міцності та закладені науково-технічні підвалини для вдосконалення існуючих технологічних варіантів та розробки нових підходів до виготовлення конкурентоспроможних на світовому рівні високоякісних твердих сплавів на основі карбіду вольфраму з ВЕС зв'язкою на заміну традиційної кобальтової для роботи в умовах динамічних ударних навантажень (зокрема проникнення кулі). Вперше в світовій практиці експериментально обґрунтована можливість консолідації сплавів WC–ВЕС в умовах високошвидкісного нагрівання.

(англ.)

On the base of the results determined by using modern physical material science methods scientific principles referred to relationships of structure, phase composition, physical and mechanical properties formation of frame metal-ceramic composites based on tungsten carbide with a multicomponent high-entropy alloy (HEA) binder during high-speed electron-beam and induction sintering has been developed for the first time and will play an important role in deepening the understanding of the processes of structure formation in dispersed heterogeneous systems.

The relationship for the effect of HEA binder content, the time of mixing of the initial powder components and processing parameters of sintering on the mechanism of shrinkage, the formation of structure, phase composition, WC grains size, physical and mechanical properties of the framework metal-ceramic composites for ballistic purposes, obtained from WC and HEA powders under conditions of high-speed electron-beam and induction heating, have been established. The regularities of the process of thermodynamic, kinetic, chemical interaction between the materials of the frame (WC) and the matrix phase (HEA) of the volume-reinforced composite and its influence on the structure and properties of frame metal-ceramic composites were determined, and the

coefficients of thermal expansion and thermal conductivity of frame metal-ceramic WC–HEA composites has been justified for the first time.

Principles for control of phase composition, structure, shrinkage, and strength characteristics of powdered frame composite WC–HEA hard alloys for ballistic purpose have been justified during optimization of composition and processing parameters of sintering. This would be valuable for development of conceptually new approaches used for creation of high-strength WC-based composites with HEA binder instead Co one. Reasonable conditions for creation high-strength WC-based alloys with HEA binder have been justified and physical principles of strength of the above alloys have been developed. This is thought to be scientific and technical foundation for improvement of conventional technological options as well as for design of novel technical approaches for production of high-quality WC-based hard alloys with HEA binder to replace the traditional cobalt one used under conditions of dynamic shock loads (in particular, bullet penetration), making them competitive all around the world. For the first time in world practice, the possibility of consolidation of WC–HEA alloys under conditions of high-speed heating has been experimentally substantiated.

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

Мініцький А.В., Биба Є.Г., Сисоєв М.О., Лобода П.І., Радчук С.В. Спосіб виготовлення композиційних матеріалів. Патент України на винахід. № 125188 від 26.01.2022. Бюл. № 4 (72). <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1675011/>

Заявка у 2023 04382 від 15/09/2023 на видачу патенту на корисну модель. Юркова О.І., Наконечний С.О., Мініцький А.В., Михайліченко В.В. (студ.), Биба Є.Г. «Створення тврдосплавних матеріалів зі зв'язкою з високоентропійного NiFeCrWMo сплаву»

5. Порівняння зі світовими аналогами.

В роботі вперше запропоновано та здійснено новий нетривіальний підхід для створення високощільних каркасних металокерамічних композитів із застосуванням надтвердих матеріалів (WC) і високоентропійних сплавів, як зв'язки на заміну традиційного кобальту, в поєднанні з інноваційними швидкісними методами спікання (електронно-променевого та індукційного) порошків для покращення як структури (збереження розмірів вихідних зерен тугоплавкої сполуки WC) та комплексу фізико-механічних характеристик спечених композитів, так і спікаємості тугоплавких компонентів, що є одним з найбільш перспективних підходів для отримання бронебійних сердечників збільшеної пробивної здатності для боєприпасів стрілецької зброї. Аналогів такому підходу немає, Результати роботи відповідають світовому рівню. Оптимізація складу каркасних металоматричних композитів на основі WC з багатокомпонентною зв'язкою та застосування інноваційних швидкісних методів спікання порошкових композицій дозволяє на 20–30 % підвищити їх механічні властивості та пробивну здатність у порівнянні з кращими світовими аналогами з традиційних сплавів.

6. Економічна привабливість для просування на ринок

Отримані наукові результати мають практичний інтерес для розробки нових та вдосконалення існуючих технологічних варіантів виготовлення конкурентоспроможних на світовому рівні нових перспективних твердих сплавів з підвищеними фізико-механічними характеристиками (міцності, твердості, модуля пружності, питомої ваги) на основі карбіду вольфраму з високоентропійною зв'язкою, які мають перспективи застосування в умовах динамічних ударних навантажень.

Використання результатів розробки та запропонований підхід дозволяє створювати конкурентоспроможні матеріали та вироби/деталі з них для роботи в екстремальних умовах експлуатації, як завдяки підвищенню фізико-механічних властивостей, так і завдяки зменшенню собівартості, за рахунок скорочення часу процесу спікання, що значно знизить потребу в енергетичних і людських ресурсах та значно зменшить шкідливі викиди в атмосферу, дозволить значно підвищити конкурентоздатність вітчизняної продукції та технологій, а також; підвищити безпеку та обороноздатність держави.

б. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, відомства, підприємства, організації).

Результати роботи є важливими для різних галузей техніки та промисловості, насамперед, у сфері національної безпеки та оборони України (підприємства «Укроборонпрома»), а також є перспективними щодо забезпечення потреб гірничо-металургійного та газонафтовидобувного комплексів матеріалами здатними працювати в умовах великих динамічних навантажень.

7. **Стан готовності розробки** (лабораторний або промисловий зразок, технічна документація, бізнес-план, готова до впровадження тощо із зазначенням технологічного рівня готовності (TRL)).

Розроблено наукові основи керування фазовим складом, структурою, рівнем характеристик міцності для створення каркасних металокерамічних композитів на основі карбіду вольфраму з висоентропійною зв'язкою на заміну кобальтової для забезпечення екстремально високих балістичних характеристик. Це дозволяє розвинути концептуально нові підходи щодо створення високоміцних твердих сплавів з підвищеними фізико-механічними властивостями. Обґрунтовано умови отримання високоміцних станів каркасних металокерамічних композитів, суттєво розвинуто фізичні основи міцності цих сплавів та закладено науково-технічні підвалини для вдосконалення існуючих технологічних варіантів та розробки нових підходів до виготовлення конкурентоспроможних високоміцних твердих сплавів на основі карбіду вольфраму для роботи в умовах динамічних ударних навантажень.

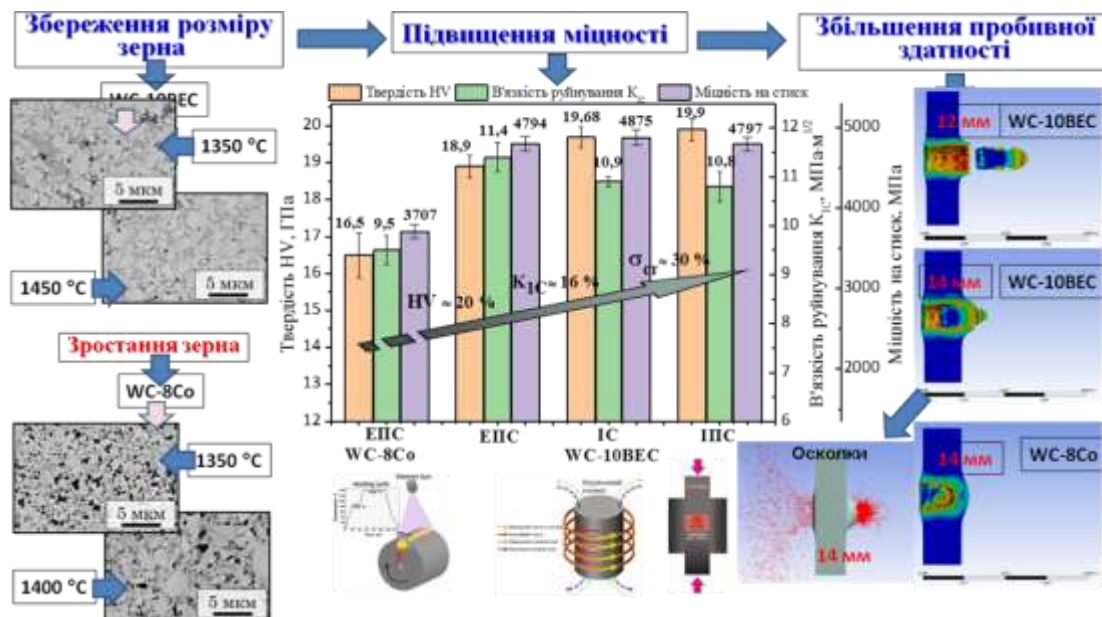
8. **Існуючі результати впровадження.**

Отримані результати використані при підготовці бакалаврів і магістрів на кафедрі високотемпературних матеріалів та порошкової металургії КПІ ім. Ігоря Сікорського для вдосконалення навчальних дисциплін: «Технологія виробництв порошкових, композиційних та нанодисперсних матеріалів» (розділ «Спечені тверді сплави») та «Рентгенівський аналіз дисперсних матеріалів» (розділ «Методи визначення дисперсності матеріалів»).

9. **Назва підрозділу, телефон, e-mail.**

Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона, кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії. Тел.. 095 066 50 81, e-mail: yurkova2403@gmail.com

10. **Фото (обов'язково) або кілька слайдів презентації з фото розробки в електронному вигляді (рекламного характеру).**



11. **Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання (вагомі: монографії, підручники, посібники, наукові статті, дисертації, інші публікації).**

1. Solodkyi I., Teslia S., Bezdorozhev O., Trosnikova I., Yurkova O., Bogomol I., Loboda P. Hardmetals prepared from WC-W₂C eutectic particles and AlCrFeCoNiV high entropy alloy as a binder, *Vacuum* (Q1), Volume 195, January 2022, 110630. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110630>
2. Yurkova, A.I., Nakonechnyi S.O., Cherniavsky, V.V., Kushnir V.V. (студ.), Nanostructured AlCoFeCrVNi and AlCoFeCrVTi high-entropy alloys resulted from mechanical alloying and sintering / *Applied Nanoscience* (Q2), 2022, Vol. 12, pp. 849–860. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01856-x>
3. Ievgen Solodkyi, Iurii Bogomol, Petro Loboda. High-speed electron beam sintering of WC-8Co under controlled temperature conditions / *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* (Q1), 2022, Vol. 102, 105730. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105730>
4. S.Teslia, I. Solodkyi, O. Yurkova, O.Bezdorozhev, I. Bogomol, P. Loboda. Phase compatibility in (WC–W₂C) / AlFeCoNiCrTi composite produced by spark plasma sintering // *J. of Alloys and Compounds* (Q1), 2022, Vol. 921, 166042. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166042>
5. Nakonechnyi S., Soloviova T., Yurkova A., Solodkyi I., Loboda P. Cold sprayed AlNiCoFeCr–TiB₂ metal matrix composite coatings / *Vacuum* (Q1), 2023, Vol. 213, 112144 <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112144>
6. Yurkova A.I., Hushchuk, D.V. (асп.), Minitsky A.V. Synthesis of High-Entropy AlNiCoFeCrTi Coating by Cold Spraying. / *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* (Q3), 2021, Vol. 59(11-12), pp. 681–694. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00203-7>
7. Minitskyi A.V., Loboda P.I., Byba Ye.G., Trosnikova I.Yu., Khovavko O.I. Effect of Production Methods on Microstructure, Phase Composition, and Properties of Hard Alloy VK8 with Submicron Grain // *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii* (Q3), 2021. Vol.19, No 4. – P. 1001-1008. <https://doi.org/10.15407/nnn>
8. Akimov G.Ya., Andreev I.V., Loboda P.I., Trosnikova I.Yu., Sheremet V.I., Novokhatska A.O., Melakh L.M. The effect of cold isostatic pressing of powder billets produced from the VK8 hardmetal on its hardness and phase composition after sintering. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* (Q3), 2021, Vol. 60, No. 3-4. – p. 142-149. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00235-z>
9. Akimov G. Ya., Andreev I. V., Shereme V. It, Trosnikova I. Yu., Loboda P. I., Kosenchuk T. O. Structure and Mechanical Properties of WC–8 wt.% Co Hardmetal Produced by Cold and Hot Isostatic Pressing // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* (Q3), 2022. – Vol. 61, No 1-2. – p. 9-17. <https://doi.org/10.1007/s11106-022-00290-0>
10. Nakonechnyi S., Yurkova A., Minitskyi A. WC-based Cemented Carbides with Nanostructured NiFeCrWMo High-Entropy Alloy Binder // Proceedings of the 2022 IEEE 12th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). (2022) 11-16 September 2022, Krakow, Poland, P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/nap55339.2022.9934594>.
11. Nakonechnyy S., Yurkova A. The nanostructured NiFeCrVMo high-entropy alloy binder versus traditional Co binder for WC-based hard alloys / Proceedings of the 2023 IEEE 13th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). (2023) 10-15 September 2023 Bratislava. <https://doi.org/10.1109/nap59739.2023.10310998>
12. Мініцький А.В., Лобода П.І., Биба Є.Г., Троснікова І.Ю., Ховавко О.І. Вплив методів виробництва на мікроструктуру, фазовий склад та властивості твердого сплаву ВК8 із субмікронним зерном // *Наносистеми, Наноматеріали, Нанотехнології* (кат. А) – 2021. – т.19, № 4. – С. 1001-1008. <https://www.imp.kiev.ua/nanosys/ru/articles/2021/4/index.html>
13. Акимов Г.Я., Андреев І.В., Шеремет В.І., Троснікова І.Ю., Лобода П.І., Косенчук Т.О. Структура та механічні властивості твердого сплаву WC–8%(мас.)Co, виготовленого з використанням холодного та гарячого ізостатичного пресування // *Порошкова металургія* (кат. А). – 2022. – № 1-2. – с. 12-23. <http://www.materials.kiev.ua/article/3377>
14. Акимов Г.Я., Андреев І.В., Лобода П.І., Троснікова І.Ю., Шеремет В.І., Новохацька А.О., Мелак Л.М. Вплив холодного ізостатичного пресування порошкових заготовок твердого сплаву ВК8 на його твердість і фазовий склад після спікання // *Порошкова металургія* (кат. А). – 2021. – № 3-4. – с. 18-28. http://www.materials.kiev.ua/article/3209?emp_id=688
15. Юркова О.І., Мініцький А.В., Наконечний С.О., Шапошнікова Є.С., Білик І.І. Дослідження впливу високошвидкісних режимів спікання на структуру та властивості

твердосплавного композиту на основі WC з високоентропійною зв'язкою / *Надтверді матеріали* (кат. А). – 2024, № 1, с. 40-49.

16. Наконечний С.О., Юркова А.І., Лобода П.І. Структура та механічні властивості твердого сплаву на основі WC з NiFeCrWMo високоентропійною зв'язкою // *Порошкова металургія* (кат. А). – 2023. – № 11/12.

17. Мініцький А.В., Биба Є.Г., Юркова О.І., Мініцька Н.В. Вплив параметрів плакування нікелем на властивості порошків карбіду вольфраму // *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»* (кат. Б). – 2021. – № 72. – С. 13-17. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2021.72.2>

18. Наконечний С.О., Дмитришин Д.Р. (студ.), Мороз В.О. (студ.), Юркова О.І. Високоентропійний NiFeCrWMo сплав, отриманий в процесі механічного легування. *Металознавство та обробка металів* (кат. Б). 2023, Том 29, № 2, с. 44-58. <https://momjournal.org.ua/index.php/mom/article/view/96>

19. Романенко Ю.М., Степанов О.В., Лобода П.І., Богомол Ю.І. Ефективні теплофізичні властивості порошкових матеріалів при спіканні в умовах електронно-променевого нагрівання. *Наукові вісті КПП* (кат. Б). – № 1. – 2021. – С. 63-69. <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.1.215024>

20. Мініцький А.В., Поліщук К.В., Юркова О.І., Мініцька Н.В., Наконечний С.О. Вплив способу введення нікелевої зв'язки на структуру і властивості сплавів на основі вольфраму. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»* (кат. Б). – 2023. № 75 с. 134-139. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2023.75>

21. Мініцький А.В. «Створення фізико-технологічних основ виготовлення високощільних порошкових матеріалів»: дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спец. 05.16.06, науковий консультант – д.т.н., проф. Лобода П.І. 2021 р., КПП ім. Ігоря Сікорського.

25 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

12. Надати ключові слова до розробки

Твердий сплав, карбід вольфраму, високоентропійний сплав, кобальт, механічне легування, електронно-променево спікання, індукційне спікання, структура, механічні властивості