

**Розробка технології виготовлення композиційної керамічної, металокерамічної та металополімерокерамічної броні із надміцних надтвердих армованих керамічних матеріалів**

**Разработка технологии изготовления композиционной керамической, металлокерамической и металополимерокерамической брони с сверхпрочных сверхтвердых армированных керамических материалов**

**Development of manufacturing technique of ceramic, metal-ceramic and metalopolimerceramic composite armor by using superstrength, superhard reinforced ceramic materials**

**1. Номер державної реєстрації теми - 0115U002328,**

**2. Науковий керівник -** д.т.н., проф.. Лобода П.І., Лобода П.И., Loboda Petro. I.

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

**(укр.)**

Розроблено технологію виготовлення композиційних керамічних та металокерамічних надміцних (40 ГПа міцність при стисненні) надтвердих (30 ГПа) армованих матеріалів на основі карбіду бору та бориду титану чи алюмінію, наноструктурного  $B_6O$  методом гарячого пресування. Встановлено, що зміна технологічних параметрів процесу гарячого пресування дозволяє контролювати хімічний, фазовий склад та структуру (розмір зерен, геометричні розміри армуючої складової). Досліджені механічні властивості армованих керамічних матеріалів та доведено перспективність використання для виготовлення принципово нового класу керамічних та металокерамічних композитів, що здатні ефективно працювати в умовах високих динамічних навантажень. Розроблено армований металокерамічний композит Ti-TiB який показав підвищені механічні і функціональні характеристики при експериментальних випробуваннях в умовах інтенсивного абразивного зносу та ударних навантажень при високих швидкостях. Завдяки армуванню у розробленому композиті спостерігається збільшення міцності більш як у два рази, що дозволяє використовувати матеріал в якості підпору при виготовлення бронепластин. Більш того матеріал володіє ефектом самозаточування, що дозволяє значно збільшити час безперервної експлуатації ріжучих пластин і, таким чином, значно підвищити продуктивність різання, що робить даний матеріал конкурентоспроможним на світових ринках наукоємної продукції.

**(рос.)**

Разработана технология изготовления композиционных керамических и металлокерамических сверхпрочных (40 ГПа прочность при сжатии) сверхтвердых (30 ГПа) армированных материалов на основе карбида бора и боридов титана или алюминия, наноструктурного  $B_6O$  методом горячего прессования. Установлено, что изменение технологических параметров процесса горячего прессования позволяет контролировать химический, фазовый состав и структуру (размер зерен, геометрические размеры армирующей составляющей). Исследованы механические свойства армированных керамических материалов и доказана перспективность использования для изготовления принципиально нового класса керамических и металлокерамических композитов, способных эффективно работать в условиях высоких динамических нагрузок. Разработан армированный металлокерамический композит Ti-TiB который показал повышенные механические и функциональные характеристики при экспериментальных испытаниях в условиях интенсивного абразивного износа и ударных нагрузках при высоких скоростях. Благодаря армированию в разработанном композите наблюдается увеличение прочности более чем в два раза, что позволяет использовать материал в качестве подпора при изготовлении бронепластин. Более того материал обладает эффектом самозатачивания, что позволяет значительно увеличить время непрерывной эксплуатации режущих частей и, таким образом, значительно повысить производительность резания, делает данный материал конкурентоспособным на рынке режущих материалов. **(англ.)**

The technology of manufacturing of ceramic and metal **superstrength** composites (40 GPa compressive strength) superhard (30 GPa) reinforced materials based on boron carbide and boride of titanium or aluminum, nanostructured B<sub>6</sub>O by hot pressing. It is established that changing technological parameters of hot pressing allows controlling chemical, phase composition and structure (grain size, the geometric dimensions of the reinforcing component). It is shown that the reinforced ceramic materials have high mechanical properties and the use of proven prospects for making a fundamentally new class of ceramic and metal composites, able to work effectively under high dynamic loads. Developed new reinforced Ti-TiB composite showed improved mechanical and functional properties in experimental trials in heavy abrasion and shock loads at high speeds. Due to the effect of reinforcement the strength of the developed composite increases in over twice, Moreover due to the reinforcement in the composite the self-sharpening effect was developed and observed. It can significantly increase the time of continuous operation of cutting parts and thus significantly improve the performance of cutting, which makes the material competitive in market of cutting materials.

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

- Патент на корисну модель Спосіб отримання керамічного бронематеріалу на основі карбіду бора та дибориду титану Лобода П.І., Богомол Ю.І., Солодкий Є.В. Троснікова І.Ю. подано заявку
- Патент на корисну модель № 99564 Спосіб отримання керамічних евтектичних порошків на основі гексабориду лантану методом відцентрового плазмового розпилення Автори: Лобода П.І., Богомол Ю.І., Білий О.І., Соловйова Т.О., Ремізов Д.О. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.06.2015.
- Патент на корисну модель № 99563 Спосіб отримання керамічних евтектичних порошків на основі карбіду бору методом відцентрового плазмового розпилення Автори: Богомол Ю.І., Лобода П.І., Білий О.І., Головенько Я.Б., Соловйова Т.О., Ремізов Д.О. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.06.2015.

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

Результати відповідають світовому рівню. Створено нову композиційну броню, виготовлені та випробувані бронежилети **6-го класу захисту** та елементи навісних засобів захисту техніки. Головними перевагами створеної композиційної броні перед аналогами світових виробників є: на 40% легший за металеві, четвертого класу захисту; на 20% легший за полімерокерамічний аналог «Корсар МЗмк-1А-6»; вага пластини розмірами 250X300 не перевищує 3,5 кг; простота і високопродуктивна технологія виготовлення; ремонтпридатність (забезпечується можливістю заміни пошкоджених керамічних елементів); нижча в два рази вартість спечених керамічних елементи в порівнянні з гарячепресованими аналогами; висока технологічність монтажу на техніку, дозволяє застосовувати технології зварювання, клепанням, наклеювання, болтового з'єднання.

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

Створена та реалізовано в дослідно-промисловому масштабі технологія виготовлення прокату із армованого титану з міцністю 900-1000 МПа на розтягування та пластичністю 18%, що дозволило його використати як основу металокерамічної броні, для виготовлення бронежилетів, навісної металокерамічної броні, саперних лопат, бойових ножів, що самозаточуються, ножів для подрібнення порошку, розрізання паперу, гуми, механічної обробки композиційних вуглець-вуглецевих, вуглець-полімерних, скло-полімерних композитів тощо.

Вироби із армованого титану на 40 % легші за сталеві, а термін експлуатації в промислових умовах на порядок більший.

#### 7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).

Розроблена нова композиційна броня з армованих керамічних та металокерамічних матеріалів може застосовуватися для захисту від вогнепальної зброї як людини, так і техніки. Розроблений новий композиційний армований металокерамічний матеріал на основі титану може використовуватися на підприємствах та в організаціях різних галузей промисловості: машинобудуванні, авіа і суднобудуванні, текстильній, паперовій та деревообробній промисловостях, де широко розповсюджені технології різання різного роду матеріалів і гостро стоїть проблема підвищення ефективності виробництва. Також може застосовуватися для виробництва компонентів вогнепальної та холодної зброї.

#### 8. Стан готовності розробки.

Розроблені та виготовлені експериментальні зразки бронепластин. Проведено балістичні випробування по результатам яких складено акти. Проведена дослідно-промислова апробація різального інструменту.

#### 9. Існуючі результати впровадження.

Розроблені армовані керамічні матеріали  $B_4C-TiB_2$  та  $B_4C-SiC$  були використані при розробці та виготовленні сегментів кромки повітрозбірника ПВРД (робочі температури 1200 °C) (г/д № 1002-15) на Державному Підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» імені М.К.Янгеля», м. Дніпро. Також ці матеріали при виготовленні при розробці корпусу камери рідинного апогейного двигуна РД840 в рамках г/д № 380-15 з ДП «КБ «Південне».

Металокерамічний композиційний матеріал  $Ti-TiB$  був використаний при виготовленні сегментів ножа для різання гофрованого картону на Панінківській картонно-паперовій фабриці Хмельницької області.

**10. Форма участі інвестора** (яка краща форма участі в реалізації результатів проекту інвестора: частка в проекті %, частка від прибутку %, інше)

**11. Обсяг інвестицій** (необхідна для результатів проекту сума інвестицій у доларах США).

**12. Мета інвестицій** (розширення бізнесу, створення нового підприємства, інше).

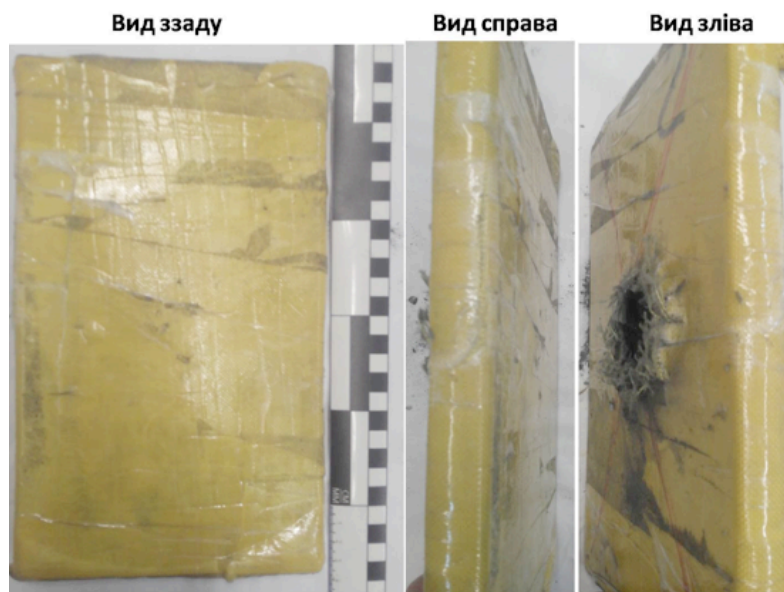
Створення нового підприємства, або модернізація виробництва на базі існуючого.

**13. Назва організації, телефон, E-mail**

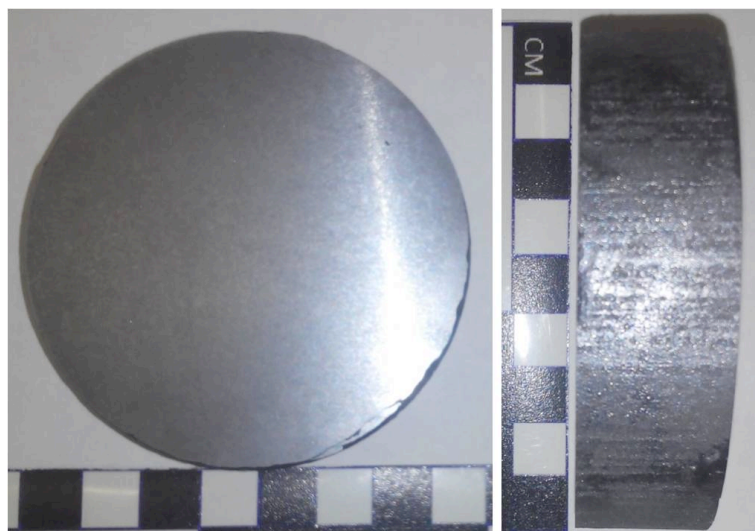
НТУУ «КПІ», інженерно-фізичний факультет, кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії,

Тел. (044) 406-82-15, [decan@iff.kpi.ua](mailto:decan@iff.kpi.ua)

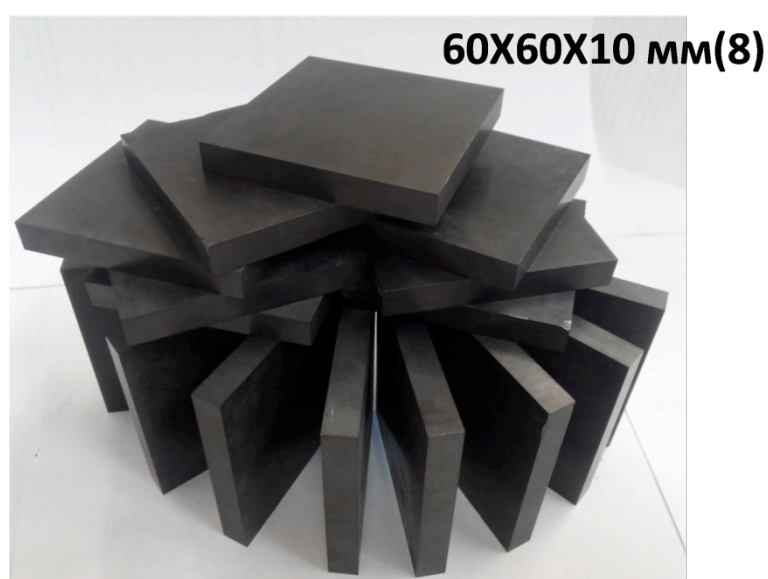
#### 14. Фото розробки



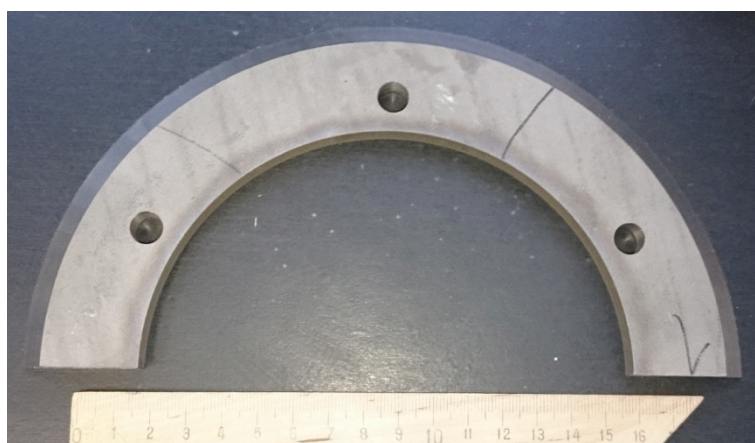
Композитна шарувата платина після випробувань



Сегменти армованої кераміки на основі  $B_4C$  отримані традиційним спіканням



Сегменти армованої кераміки на основі  $B_4C$  отримані гарячим пресуванням



Елемент різального інструменту виготовлений з розробленого армованого металокерамічного композиту Ti-TiB

## 15. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

Статті:

1. Solodkyi, D. Demirskyi, Y. Sakka, and O. Vasylykiv, "Hardness and toughness control of brittle boron suboxide ceramics by consolidation of star-shaped particles by spark plasma sintering". *Ceramics International*, 42, P. 3525–3530, 2016
2. D. Demirskyi, I. Solodkyi, Y. Sakka, and O. Vasylykiv, "High-temperature strength of boron suboxide ceramic consolidated by spark plasma sintering" *Journal of the American Ceramic Society*, 99 (8), P. 2769–2777 (2016).
3. О. М. Сизоненко, П. І. Лобода, А. Д. Зайченко, Є. В. Солодкий, А. С. Торпаков, М. С. Присташ, В. О. Трегуб, Вплив високовольного електричного розряду на дисперсність та структуру порошку  $B_4C$ , Надтверді матеріали, прийнято до друку (2016)
4. 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. doi:10.1007/s11837-016-2073-0.
5. Solodkyi, D. Demirskyi, Y. Sakka, and O. Vasylykiv, "Synthesis of Multilayered Star-Shaped  $B_6O$  Particles Using the Seed-Mediated Growth Method". *Journal of the American Chemical Society*, 98 [12], P. 3635–3638, 2015.
6. Biba, Y.G., Loboda, P.I. Effect of Mechanical Vibration on the Kinetics of Dehydrogenation and Structure Formation of  $TiH_2$  Powder Compacts During Electron Beam Sintering, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, March 2015, Volume 53, Issue 11-12, pp 628-633.
7. Соловійова Т.О., Лобода П.І., Богомол Ю.І. Ремізов Д.О., Білий О.І. Вплив кінетичних параметрів процесу кристалізації на структуру та властивості евтектичного сплаву системи  $LaB_6-TiB_2$  // Надтверді матеріали. - №6. – 2015.
8. S. S. Xie, H. Chen, I. Solodkyi, O. Vasylykiv, A. I. Y. Tok "Cyclic Formation of Boron Suboxide Crystallites into Star-Shaped Nanoplates", *Scripta Materialia*, 99 69-72 (2015).
9. Богомол Ю.І., Попович О.І., Хаземан Г., Крюгер М., Лобода П.І. Структура та властивості спрямовано закристалізованого сплаву системи  $Mo-8,7Si-18B$  / Наукові вісті НТУУ "КПІ". – №2. – 2016. – С. 69-76.
10. Григоренко Г.М., Ахонин С.В., Лобода П.І., Григоренко С.Г., Северин А.Ю., Березос В.А., Богомол Ю.І. Структура і свойства титанового сплава, легированного бором, полученного способом электронно-лучевого переплава / Современная электрометаллургия, – № 1, 2016. – С. 21-25.
11. Лобода П.І., Зворыкин Л.О., Косяк В.С., Солодкий Е.В. Анализ перспектив создания титана, армированного волокнами диборида титана, устойчивого к динамическим нагрузкам, Технологические системы, №2, С. 89-91, 2016.
12. Лобода П.І., Зворыкин Л.О., Новиков М.О., Солодкий Е.В. Особенности изменений структуры и свойств в сплаве  $Ti10$  в результате ударной механической нагрузки, Технологические системы, №2, С. 79-81, 2016.
13. Богомол Ю.І., Лобода П.І., Головенько Я.Б. Структура та властивості квазіпотрійних спрямовано армованих композитів системи  $B_4C-TiB_2-SiC$  // Металознавство та обробка металів. – № 2. – 2015. – С. 37-42.
14. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Лобода П.І. Определение возможности изготовления вертикальным прессованием длинномерных заготовок из порошка гидрида титана // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2015. –№50. – С. 133–136
15. Лобода П.І., Богомол Ю.І., Білий О.І. Структура та властивості розпиленних порошків евтектичного сплаву  $B_4C-TiB_2$  // Металознавство та обробка металів. – № 3. – 2015.
16. Соловійова Т.О., Лобода П.І., Богомол Ю.І. Ремізов Д.О., Білий О.І. Вплив кінетичних параметрів процесу кристалізації на структуру та властивості евтектичного сплаву системи  $LaB_6-TiB_2$  // Надтверді матеріали. - №6. – 2015.
17. Акимов Г.Я. Влияние ХИП на формирование свойств эвтектических композиционных порошков  $LaB_6-TiB_2$  / Г.Я. Акимов, Т.А. Соловьева, П.И. Лобода [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. – 2015. – С. 11 – 15.

## Тези:

1. I. Solodkyi, D. Demirskyi, H. Borodianska Y. Sakka, O. Vasylykiv., Hardness and toughness control of 'brittle' boron suboxide ceramics by consolidation of star-like particles using spark plasma sintering, 6th International Congress on Ceramics, August 21-25, 2016, Dresden, Germany.
2. I. Solodkyi, D. Demirskyi, Y. Sakka, O. Vasylykiv. Spark plasma sintering of  $B_6O$  star-shaped nanoplates and influence of star-shaped structure of  $B_6O$  on fracture mechanics, 3<sup>rd</sup> International Conference on Powder Metallurgy in Asia. November 8-10, 2015. P. 60.
3. Головенько Я. Б., Богомол Ю. І., Сисоєв М. О., Лобода П. І. Структура та властивості евтектичного сплаву  $B_4C-TiB_2$  легованого лантаном // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра [Електрон. ресурс]: матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ, 21 квітня 2015 р. / [редкол.: В. С. Богушевський (відпов. ред.) та ін.]. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – С. 263-279.
4. Кисла Г.П., Сисоєв М.О., Білодід Д.М., Лобода П.І. Сплави системи  $ZrO_2 - ZrB_2$  // Тези VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні», 30-31 травня 2016 р., Київ, Україна с.69.
5. S.M. Lakiza, V.I. Mazuz, Crystalization of binary and ternary eutectics. Theory and experimental results. V conference of directionally solidified eutectic ceramics, 3-7 april, 2016, Warsaw, Poland, P. 51.
6. Терещенко А.С., Сысоев М.А., Кислая Г.П., Лобода П.И. Формирование структуры в системе  $Ti-B_4C$  при получении титан-матричных композитов методом СВС // Тезисы V международной Самсоновской конференции «Материаловедение тугоплавких соединений и композитов», 24 – 25 мая 2016 г. Киев, Украина, с.68.
7. Сисоєв М.О., Терещенко О.С., Кисла Г.П., Лобода П.І. Композиційні матеріали системи  $Ti-B_4C$  отримані методом СВС // Металознавство та обробка металів, №4, 2015, с.12-16.
8. Мініцький А.В., Сисоєв М.О., Мініцька Н.В. Тривалість поверхневого термічного оброблення на структуру порошкових залізвуглецевих сплавів // Металознавство та обробка металів, 2016. – №1.–с. 3–6
9. Holovenko Y. B. Microstructure analysis of  $B_4C - TiB_2$  eutectic alloy doped with lanthanum / Y. B. Holovenko, I. I. Bogomol // Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів: матеріали восьмої міжн. конф. студентів та аспірантів, Київ, 23-24 квітня 2015р. – К.: НТУУ "КПІ", 2015. – С. 24.
10. Головенько Я.Б. Механічні властивості спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву  $B_4C - TiB_2$  легованого лантаном [Електрон. ресурс] / Я. Б. Головенько, Ю. І. Богомол // Сьома міжнародна науково-технічна конференція "Нові матеріали і технології в машинобудуванні", 21-22 травня 2015 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2015.
11. Богомол Ю.И., Лобода П.И., Головенько Я.Б. Получение, структура и свойства направленно закристаллизованных композитов системы  $B_4C-TiB_2-SiC$  // Тезисы докладов 5-й международной конференции «HighMatTech», 5 – 8 октября 2015 г., Киев, Украина, С. 157.
12. Богомол Ю.И., Лобода П.И., Головенько Я.Б., Билый А.И. Получение, структура и свойства распыленных порошков эвтектического сплава  $B_4C-TiB_2$  // Тезисы докладов 5-й международной конференции «HighMatTech», 5 – 8 октября 2015 г., Киев, Украина, С. 163.
13. Лобода П.И., Сысоев М.А., Губай И.О., Терещенко А.С. Микроструктура и свойства композиционного материала системы  $TiAl-B_4C$  // Тезисы 5-й международной конференции «HighMatTech», 5-8 октября 2015г., Киев, Украина, с.195.
14. M. Marych, I. Bogomol, P. Loboda, G. Bagliuk, H. Borodianska, O. Vasylykiv Features of the structure and properties of ceramic composite  $B_4C$ -eutectic alloy ( $B_4C-TiB_2$ ) system // 11<sup>th</sup> Conference for Young Scientists in Ceramics, SM-2015 Novi Sad, Serbia, October 21-24, 2015.



15. Головенько Я. Б., Богомол Ю. І., Сисоєв М. О., Лобода П. І. Структура та властивості евтектичного сплаву  $B_4C-TiB_2$  легованого лантаном // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра [Електрон. ресурс]: матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ, 21 квітня 2015 р. / [редкол.: В. С. Богушевський (відпов. ред.) та ін.]. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – С. 263-279.
16. Терещенко О.С., Сисоєв М.О. Металокерамічні покриття отримані алюмотермічною наплавкою // Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів [Електрон. ресурс]: матеріали VIII міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Збірка тез доповідей. 23 – 24 квітня 2015 р., Київ, Україна. – К. – С. 111.
17. Упатов М.И., Григорчук Т.Н., Абдуллаева Е.Р., Лобода П.И., Богомол Ю.И. Влияние дополнительного перемешивания расплава на структуру и свойства эвтектического сплава Mo-17,5Si-8B / Труды V-й международной Самсоновской конференции «Материаловедение тугоплавких соединений и композитов», Киев, Украина, 24 – 25 мая 2016 г. С. 23.
18. Кобылинский Ю.В., Болбут В.В., Богомол Ю.И., Лобода П.И. Внутренние напряжения в направлено закристаллизованном эвтектическом сплаве  $B_4C-TiB_2$  / Труды V-й международной Самсоновской конференции «Материаловедение тугоплавких соединений и композитов», Киев, Украина, 24 – 25 мая 2016 г. С. 67.
19. Болбут В., Богомол Ю., Крюгер М. Направленно закристаллизованные сплавы Mo- $ZrB_2$  / Труды V-й международной Самсоновской конференции «Материаловедение тугоплавких соединений и композитов», Киев, Украина, 24 – 25 мая 2016 г. С. 70.
20. Григорчук Т.М., Абдуллаева Е.Р., Богомол Ю.І. Мікроструктура спрямовано закристалізованого сплаву Mo-ZrC / Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні», ISSN 2524-0544, 31 травня 2016 р. С. 38.
21. Кобилінський Ю.В., Болбут В.В., Богомол Ю.І., Лобода П.І. Вплив термічної обробки на механічні властивості та на внутрішні напруження в спрямовано закристалізованому евтектичному сплаві  $B_4C-TiB_2$  / Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні», ISSN 2524-0544, 31 травня 2016 р. С. 77-78.
22. D. Kaplunenko, Y. Bohomol, G. Hasemann, M. Krüger Die Mikrostrukturausbildung und die Eigenschaften gerichtet erstarrter ternär-eutektischer Legierungen auf Mo-Si-B-Basis / Zweite Studentenkonzferenz zur Präsentation von Jahres- und Abschlussarbeiten, Ukraine, Kiew, 24 und 25 Mai 2016. P. 3-4.
23. Y. Kobylinskyi, V. Bolbut, M. Scheffler, I. Bogomol, P. Loboda Eigenspannungsanalyse und Reduzierung der Eigenspannungen in gerichtet erstarrter eutektischer  $B_4C-TiB_2$ -Legierung / Zweite Studentenkonzferenz zur Präsentation von Jahres- und Abschlussarbeiten, Ukraine, Kiew, 24 und 25 Mai 2016. P. 4-5.
24. O. Popovych, M. Krüger, K. Naumenko, G. Hasemann, Y. Bogomol Modellierung des Kriechverhaltens von Ni-Basis und Mo-Si-B-Legierungen am Beispiel einer Turbinenschaufel / Zweite Studentenkonzferenz zur Präsentation von Jahres- und Abschlussarbeiten, Ukraine, Kiew, 24 und 25 Mai 2016. P. 7-9.
25. T. Hryhorchuck, I. Bogomol Verbesserung der mo-legierungen durch ein zulegieren von Si, B, Al, Zr und C / Zweite Studentenkonzferenz zur Präsentation von Jahres- und Abschlussarbeiten, Ukraine, Kiew, 24 und 25 Mai 2016. P. 46-48.
26. G. Hasemann, D. Kaplunenko, M. Palm, I. Bogomol, M. Kruger Creep and Oxidation Properties of Near-Eutectic Mo-Si-B Alloy / 2016 MRS Fall Meeting, November 27-December 2, 2016, Hynes Convention Center and Sheraton Boston Hotel, Boston, Massachusetts, USA.

**Захищені дисертації:**

1. Биба Є. Г. Формування структури та механічних властивостей конструкційних титанових сплавів під час активованого спікання порошків гідриду титану. - Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.06. – Порошкова металургія та композиційні матеріали. Національний технічний університет України «Київський політехнічний», м. Київ, 2016 р.

**16. Ключові слова до розробки**

АРМОВАНА КЕРАМІКА, КОМПОЗИТ, КАРБІД БОРУ, АРМОВАНІЙ ТИТАН, ГАРЯЧЕ ПРЕСУВАННЯ, БРОНЯ.