

ОПИС ЗАВЕРШЕНОЇ РОЗРОБКИ

Фізика швидкісного електронно-променевого спікання гомогенних та гетерогенних високотемпературних матеріалів

Physics of high-speed electron-beam sintering of homogeneous and heterogeneous high-temperature materials

1. **Номер державної реєстрації** - № 0119U100816, номер реєстрації в університеті - №2208-ф.
2. **Науковий керівник:** Богомол Юрій Іванович, професор, д.т.н., Iurii Bogomol, Professor, Dr.Sci.
3. **Суть розробки, основні результати.**

(укр.)

Розробка присвячена швидкісному електронно-променевому спіканню пресовок з металевих та металокерамічних матеріалів на основі тугоплавких сполук. Встановлено основні закономірності структуроутворення в умовах електронно-променевого спікання металевих та металокерамічних матеріалів. Методами комп'ютерного моделювання проведено дослідження впливу пористості та пористої структури пресовок, спечених в умовах електронно-променевого спікання, на їх температурне поле та теплопровідність. Досліджено вплив параметрів електронно-променевого нагрівання на величину залишкових макронапружень та мікронапружень в матеріалі. Проведено аналіз напружено-деформованого стану пресовок, одержаних електронно-променевим спіканням та його впливу на процеси ущільнення. Показано, що наявність залишкових напружень має безпосередній вплив на проходження структурної та подальшої пластичної деформації порошкових пресовок різної природи. Встановлено, що механізми швидкісного ущільнення під час локального електронно-променевого нагрівання пресовок з металевих та металокерамічних матеріалів пов'язані з виникненням внутрішніх залишкових напружень в результаті термічного розширення матеріалу. Показано, що збереження цілісності заготовки і її інтенсивне ущільнення в умовах локального нагрівання стає можливим у випадку, коли термічне розширення в об'ємі циліндричної пресовки викликають напруження, що не перевищують межу міцності матеріалу. Одержані результати дозволили розробити основи принципово нової технології швидкісного електронно-променевого спікання багатофункціональних композиційних матеріалів на основі широкого спектру тугоплавких металів та сполук, що дозволить в перспективі вивести дану технологію на промисловий рівень, на відміну від існуючих технологій швидкісного спікання, які використовуються, здебільшого, тільки на лабораторному рівні.

(eng.)

The development is devoted to high-speed electron-beam sintering of samples from metal and metal-ceramic materials based on refractory compounds. The basic laws of structure formation in the conditions of electron-beam sintering of metal and metal-ceramic materials are established. Computer simulation methods have been used to study the effect of porosity and porous structure of samples sintered under electron-beam sintering conditions on their temperature field and thermal conductivity. The influence of electron-beam heating parameters on the value of residual macrostresses and microstresses in the material is investigated. The analysis of the stress-strain state of the presses obtained by electron-beam sintering and its influence on the densification processes is carried out. It is shown that the presence of residual stresses has a direct effect on the passage of structural and subsequent plastic deformation of samples of different nature. It is established that the mechanisms of high-speed densification during local electron-beam heating of presses made of metal and metal-ceramic materials are associated with the occurrence of internal residual stresses as a result of thermal expansion of the material. It is shown that maintaining the integrity of the workpiece and its intensive compaction under local heating

becomes possible in the case when thermal expansion in the volume of cylindrical sample causes stresses that do not exceed the strength of the material. The obtained results allowed to develop the foundations of a fundamentally new technology of high-speed electron-beam sintering of multifunctional composite materials based on a wide range of refractory metals and compounds, which will bring this technology to the industrial level in the future.

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

- Патент на корисну модель № 1317971 Спосіб отримання твердих сплавів П.І. Лобода, М.О. Сисоєв, І.Ю. Троснікова, В.П. Ткачук, А.В. Мініцький, І.І. Білик, Є.Г. Биба. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.01.2019.
- Патент на корисну модель № 136748 Спосіб отримання армованого металокерамічного композиту на основі титану Ремізов Д.О., Лобода П.І., Богомол Ю.І. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 27.08.2019.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Результати відповідають світовому рівню, а методика швидкісного електронно-променевого спікання пресовок не має аналогів у світі.

6. Економічна привабливість для просування на ринок.

Застосування швидкісного електронно-променевого спікання пресовок значно скорочує час, а також енергетичні витрати на отримання виробів з металевих та металокерамічних матеріалів.

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

Матеріали одержані при виконанні НДР запропоновано для реалізації в промисловому виробництві підприємствам України (КБ «Південне»; КНВО «Форт» МВС України; заводу «Порошкової металургії» м. Бровари, ДП НВКГ "Зоря" - "Машпроект") та закордонним виробникам і споживачам продукції, яка виготовляється із металевих та металокерамічних матеріалів.

8. Стан готовності розробки.

Лабораторні зразки (*TRL 4*).

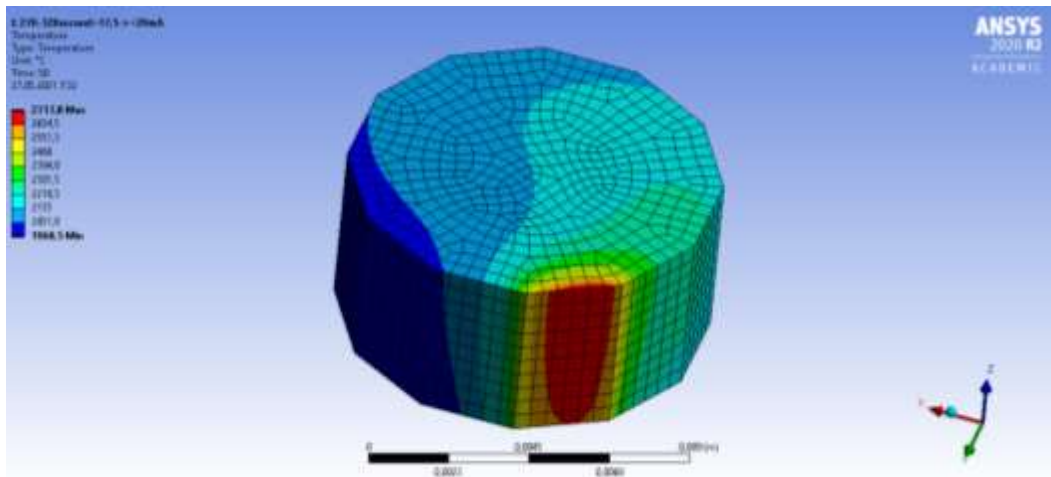
9. Існуючі результати впровадження.

-

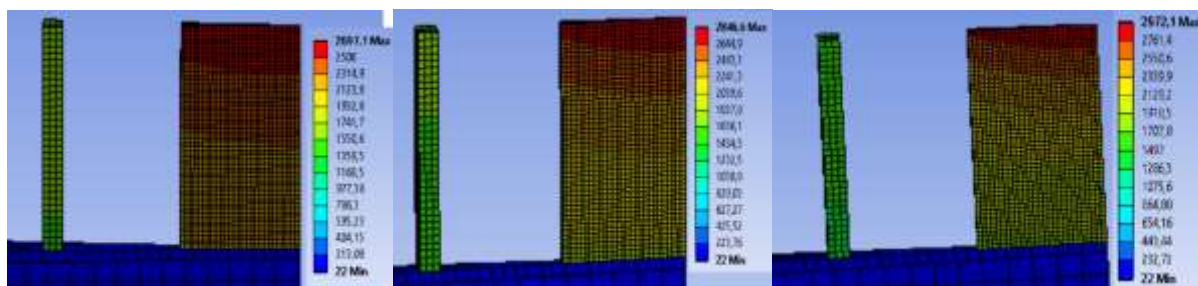
10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона, кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, тел. (044) 204-82-15, decan@iff.kpi.ua, ubohomol@iff.kpi.ua

11. Фото розробки



а



б

Модель теплопередачі у пресовці молибдену під час електронно-променевого спікання (а - зразок, що обертається; б - статичний зразок)

12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання

1. Olha Kauss, Susanne Obert, Iurii Bogomol, Thomas Wablat, Nils Siemensmeyer, Konstantin Naumenko, Manja Krüger Temperature resistance of Mo₃Si: phase stability, microhardness and creep properties // *Metals* 2021, 11, 564.
2. Ю.М. Романенко, О.В. Степанов, П.І. Лобода, Ю.І. Богомол Ефективні теплофізичні властивості порошкових матеріалів при спіканні в умовах електронно-променевого нагрівання. *Наукові вісті КПП.* – №1. – 2021. – С. 63-69.
3. I. Solodkyi, S. Teslia, O. Bezdorozhev, I. Trosnikova, O.Yurkova, I. Bogomol, P. Loboda *Hardmetals prepared from WC-W₂C eutectic particles and AlCrFeCoNiV high entropy alloy as a binder*, *Vacuum*, Volume 195, January 2022, 110630.
4. 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* Volume 102, January 2022, 105730.
5. Wenbo Du, Zhengjun Yao, Shasha Zhang, Xuwei Tao, Oleksandr Moliar, Petro Loboda, Ievgen Byba, Tetiana Soloviova, The influence of in-situ composite coating prepared by electron beam cladding on improving durable oxidation resistance, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 820, 2020, 153303, ISSN 0925-8388.
6. Trosnikova I.Y., Loboda P.I., Karasevska O.P. The Structure and Properties of the Molybdenum-Doped WC–W₂C Eutectic Alloy Depending on the Production Method. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* V. 58, P. 36–41 (2019).
7. Trosnikova I.Y., Loboda P.I. Influence of Obtaining Conditions on Microstructure, Phase Composition and Properties of Eutectic Alloy of WC-W₂C System. *Journal of Superhard Materials.* V.41, 49–52 (2019).
8. Лобода П.І., Ремізов Д.О., Григоренко С.Г., Березос В.О., Северін А.Ю. Однорідність мікроструктури сплаву Ti–TiB, отриманого в умовах електронно-променевого переплаву. *Сучасна електрометалургія*, № 3, 2019, С. 55-61.

9. Ремізов Д.О., Богомол Ю.І., Лобода П.І. Вплив структурно-геометричних характеристик фазових складових на механічні властивості закристалізованого із розплаву евтектичного складу Ti–TiB / Проблеми тертя та зношування, – № 2(87), 2020. – С. 68-77.
10. Ремізов Д.О., Богомол Ю.І., Лобода П.І. Вплив швидкості кристалізації на мікроструктуру та властивості сплаву Ti–TiB / Современная электрометаллургия, – № 1, 2020. – С. 46-51.
11. Wenbo Du, Zhengjun Yao, Shasha Zhang, Xuewei Tao, Oleksander Moliar, Xiangshuo Li, Qichao Zhang, Mengxin Yao, Petro Loboda, Tetiana Soloviova The effect of B doping on the oxidation resistance of Ti6Al4V by EBF3, Corrosion Science, Volume 173, 2020, P. 108766-108775.
12. О.В.Степанов, Ю.М.Романенко, П.І.Лобода, Ю.Є.Андрієнко, Ю.І.Богомол Розрахунок ефективної теплопровідності пористого тіла для умов електронно-променевого нагрівання. Науковий вісник Херсонської державної морської академії, – №2, – 2020.
13. Петруша В.С., Болбут В.В., Богомол Ю.І. Структура та властивості спрямовано закристалізованого сплаву системи Mo–Ti–B / Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні», КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 30-31 травня 2019 р., С. 150.
14. I. Bogomol New materials and prospective technologies / Modern Science for New Industries, China-Ukraine International Symposium on Innovation and Technology II 2019, 25 June 2019. Kyiv, Igor Sikorsky KPI, Ukraine.
15. Богомол Юрий Армированные керамические материалы в экстремальных условиях эксплуатации // Международный форум по комплексному использованию ресурсов ванадия и титана в Паньчжихуа «ФОРУМ 2019», 17-19 ноября 2019, г. Паньчжихуа, Китай, С. 7.
16. Богомол Юрий Инновационная технология изготовления композитного керамического материала // Международный форум по комплексному использованию ресурсов ванадия и титана в Паньчжихуа «ФОРУМ 2019», 17-19 ноября 2019, г. Паньчжихуа, Китай, С. 8.
17. Ponomarenko L., Tkachuk V., Sysoiev M., Loboda P. Heat treatment influence on WC-8Co alloy properties // Thesis of 6th international conference HighMathTech 2019 October 28-30, 2019, Kyiv, Ukraine, P. 95.
18. Stepanoff O. V., Romanenko Yu. M., Bogomol Yu. I., Brychko S. O. Finite-element model of effective thermal conductivity of porous Mo body // Thesis of 6th international conference HighMathTech 2019 October 28-30, 2019, Kyiv, Ukraine, P. 23.
19. Юрий Богомол Новый армированный металлокерамический композит на основе титана полифункционального назначения / Конференция по обмену опытом передовых технологий (организована Научно-техническим бюро города Уху и Индустриальным инновационным центром города Уху, провинции Анхуй, КНР), on-line, 16 июня 2020.
20. Loboda P., Bogomol I., Solodkyi I. High-speed electron-beam sintering as alternative to spark plasma sintering and 3D printing // Book of abstracts of 7th International Samsonov conference “Materials Science of Refractory Compounds” (MSRC), May 25-28, 2021, Kyiv, Ukraine, P. 25.
21. Ponomarchuk S.H., Solodkiy E.V., Loboda P.I., Kovrizhko O.M., Brychko S.O., Bogomol I. Some aspects of thermochemical activation of molybdenum sintering // Book of abstracts of 7th International samsonov conference “Materials Science of Refractory Compounds” (MSRC), May 25-28, 2021, Kyiv, Ukraine, P. 118.
22. Andriienko Yu., Stepanoff O., Bogomol I. Computer simulation of porous material effective thermal conductivity with finite-element analysis // Book of abstracts of 7th International samsonov conference “Materials Science of Refractory Compounds” (MSRC), May 25-28, 2021, Kyiv, Ukraine, P. 121.

23. Юрий Богомол Армированные металлокерамические материалы для экстремальных условий эксплуатации / 2021 New Materials Matchmaking Conference “Foreign Experts Visit to Shaoxing”, on-line Украина-КНР, 27 сентября 2021.
24. Solodkyi Ievgen, Teslia Sergii, Bogomol Iurii, Yurkova Alexandra, Bezdorozhev Oleksii, Nakonechnyi Sergii, Vterkovskiy Mykhailo, Soloviova Tatiana, Trosnikova Irina, Loboda Petro Metal-ceramic composites based on reinforced ceramics / Book of Abstracts HighMatTech UMRS 7th International Materials Science Conference HighMatTech-2021, October 5-7, 2021 Kyiv, Ukraine, P. 11.
25. Stepanov Oleh, Bogomol Yuriy, Loboda Petro, Romanenko Yuriy, Kozakovtsev Vladyslav Computer simulation of the temperature field during electron beam heating of porous body / Book of Abstracts HighMatTech UMRS 7th International Materials Science Conference HighMatTech-2021, October 5-7, 2021 Kyiv, Ukraine, P. 37.
26. Патент на винахід № UA 123592 Металокерамічний композиційний матеріал для електродів контактного зварювання Лобода П.І., Соловйова Т.О., Солодкий Є.В., Троснікова І.Ю., Богомол Ю.І. 28.04.2021, бюл. № 17/2021.
27. Патент на винахід № UA 122359 С2 Спосіб отримання металокерамічного композиційного матеріалу для електродів контактного зварювання Лобода П.І., Соловйова Т.О., Солодкий Є.В., Троснікова І.Ю., Богомол Ю.І. 26.10.2020, бюл. № 20.
28. Патент на корисну модель № 1317971 Спосіб отримання твердих сплавів П.І. Лобода, М.О. Сисоєв, І.Ю. Троснікова, В.П. Ткачук, А.В. Мініцький, І.І. Білик, Є.Г. Биба. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.01.2019.
29. Патент на корисну модель № 136748 Спосіб отримання армованого металокерамічного композиту на основі титану Ремізов Д.О., Лобода П.І., Богомол Ю.І. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 27.08.2019.
30. Вибір і комп’ютерний дизайн матеріалів: Комп’ютерний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 132 «Матеріалознавство» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. В. Степанов, Ю. І. Богомол, І.М. Гурія. – Електронні текстові дані (1 файл: , Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 103 с.
31. Інформатика, обчислювальна техніка, програмування та числові методи. Комп’ютерний практикум (Частина 1) [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 132 «Матеріалознавство». Степанов О.В., Биба Є.Г., Соловйова Т.О. Електронне мережне видання. Гриф: Метод рада КПІ ім. Ігоря Сікорського (прот. 2 від 31.10.2019) url: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/36405>

32. Надати ключові слова до розробки

ЕЛЕКТРОННИЙ ПРОМІНЬ, ШВИДКІСНЕ СПІКАННЯ, МОЛІБДЕН, ТВЕРДИЙ СПЛАВ

**Ваша розробка буде розміщена в базі завершених розробок на сайті
Наука та інноватика КПІ ім. Ігоря Сікорського <http://science.kpi.ua/> .**

Організаційно-аналітичний відділ НДЧ,

e-mail: o.savitch@kpi.ua

к. 138-1. Тел. 204-92-00.