



Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



Завершена фундаментальна науково-дослідна робота

# Високотемпературні композиційні керамічні матеріали армовані високоентропійними сплавами на основі боридів перехідних металів

Науковий керівник Ю.І. Богомол  
д/б НДР № 2503-ф

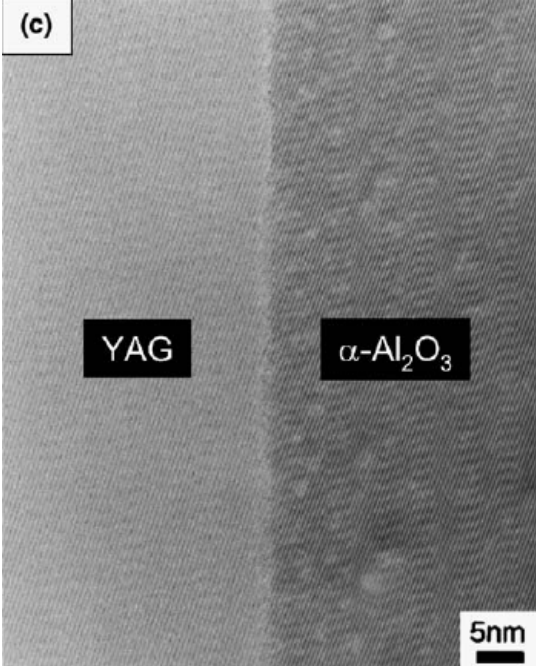
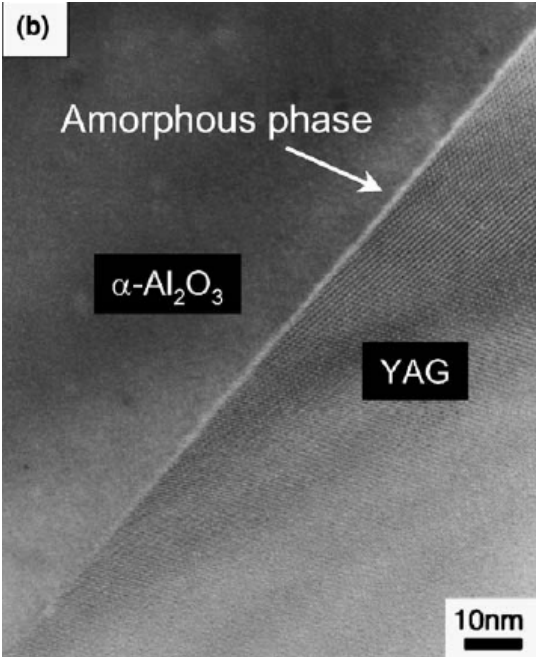
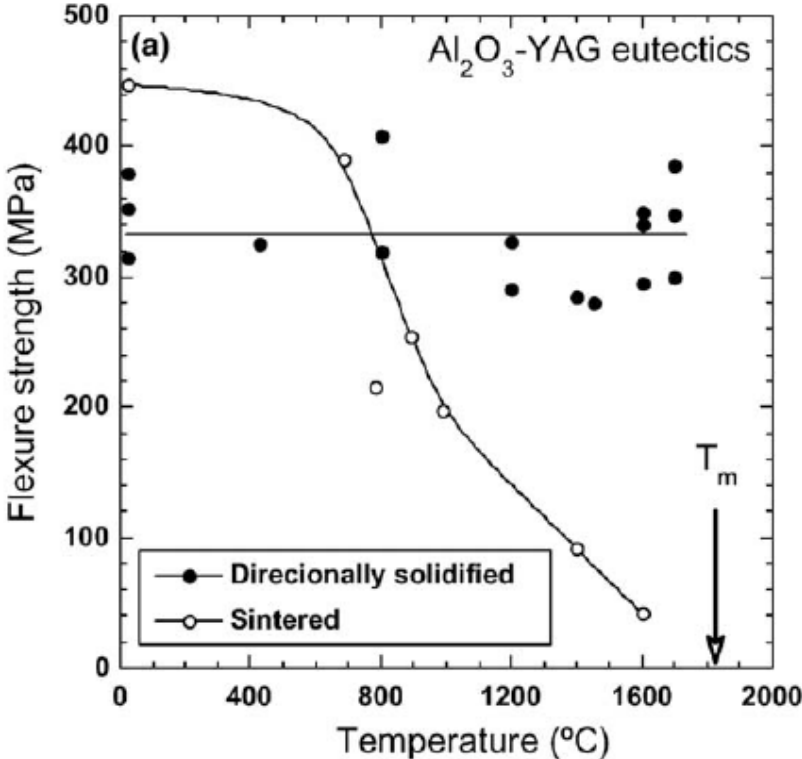


Кераміка перспективна для екстремальних умов експлуатації:

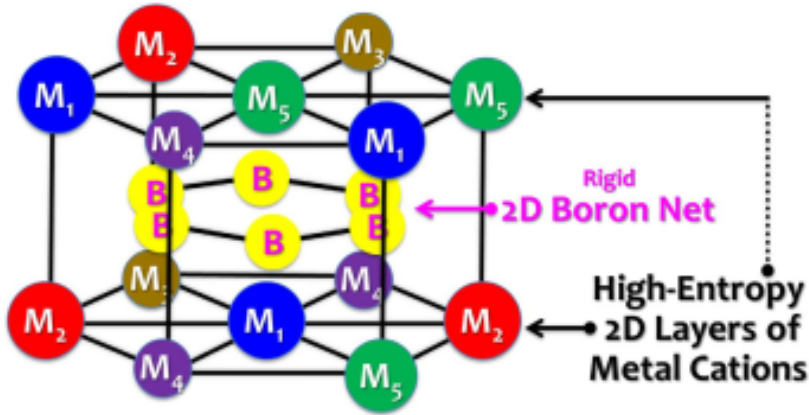
- Високотемпературні конструктивні та функціональні частини (сопла, камери, турбінні лопатки, термостійкі катоди та ін.);
- інструмент,;
- Броня та ін.



# Високотемпературна міцність керамічних евтектик



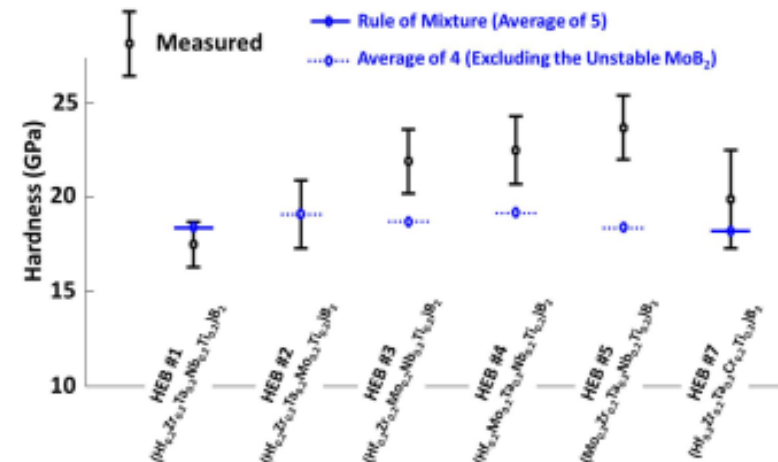
# Високоентропійні бориди



- унікальна шарувата гексагональна кристалічна структура з чергуванням жорстких двовимірних (2D) сіток бору та високоентропійних 2D шарів катіонів металів (як по суті класу квазі-2D матеріалів з високою ентропією), яка чітко відрізняється з будь-яких інших високоентропійних кристалічних фаз;
- висока термостійкість структури, фізико-механічні властивості;
- Висока стійкість до окислення.

## \*\*SPSed (Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub>

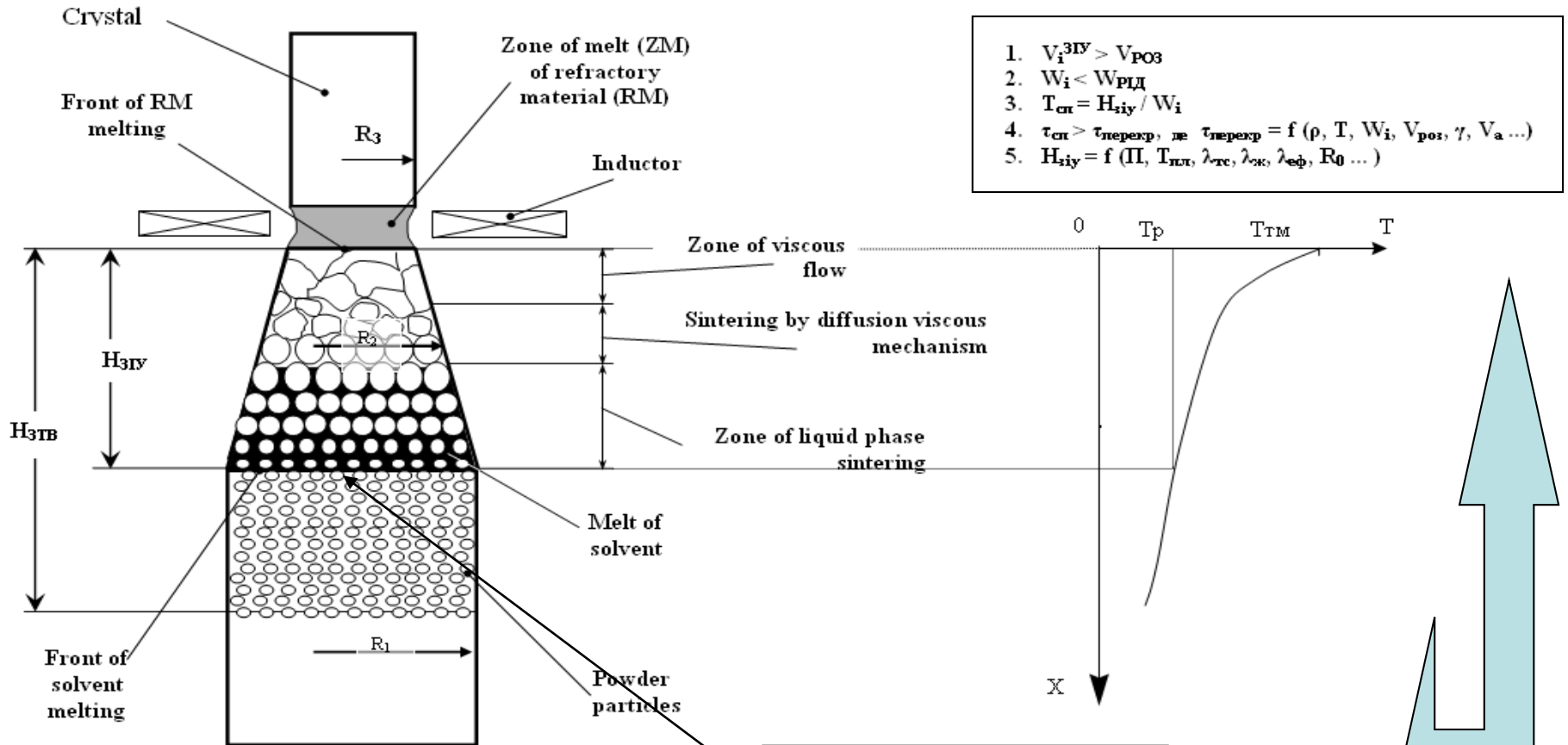
Temperature (°C)	Crosshead rate (mm/min)	Flexural strength (MPa)	Average grain size (μm)
RT	0.2	507 ± 10	4.3 ± 1.6
1000	0.8	612 ± 26	3.9 ± 1.6
1400	1.1	776 ± 26	4.2 ± 1.6
1600	1.6	829 ± 84	4.1 ± 1.7
1800	2.25	759 ± 40	4.2 ± 1.7
2000	2.5	747 ± 25	5.0 ± 2.0
2100	3.5	672 ± 18	5.2 ± 1.9



\*Gild et.al. High-Entropy Metal Diborides: A New Class of High-Entropy Materials and a New Type of Ultrahigh Temperature Ceramics / Scientific Reports | 6:37946 | DOI: 10.1038/srep37946

\*\*Feng L, Fahrenholtz WG, Hilmas GE, Zhou Y, Bai J. Strength retention of single-phase high-entropy diboride ceramics up to 2000°C. J Am Ceram Soc. 2023;1–10. <https://doi.org/10.1111/jace.19438>

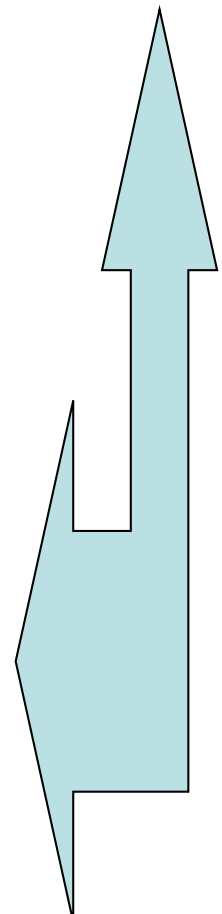
# SCHEME OF PROCESS OF CRUCIBLELESS ZONE MELTING OF POWDERED MATERIALS WITH THE MOVING SOLVENT OF ADMIXTURES



**Наша НДР:**  
 $B_4C-(Ti_xZr_{1-x})B_2$   
 $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$   
 $B_4C-(V,Ta,Cr,Mo,W)B_2$   
 $SiC-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$

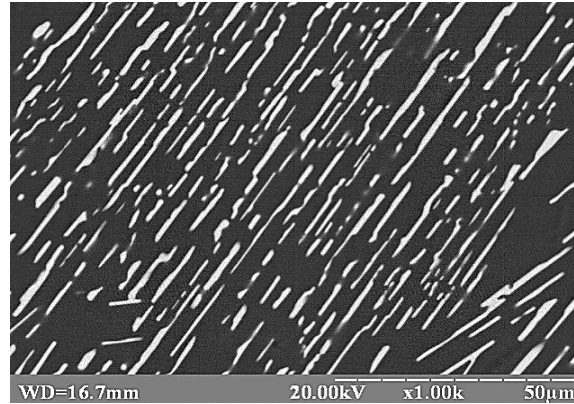
**Kinetic of processes:**

- heat transfer;
- sintering;
- grain grow;
- capillary transfer of impurity solvent flux;
- refinement.

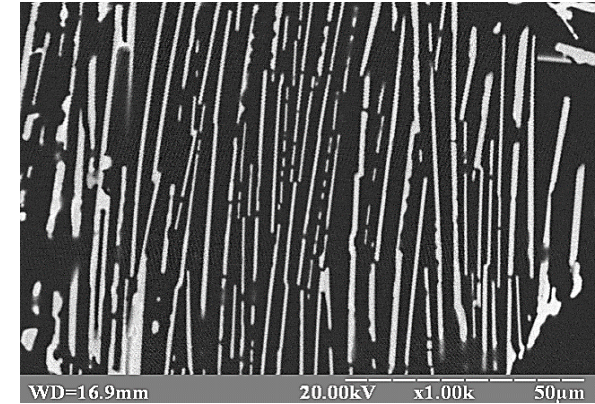




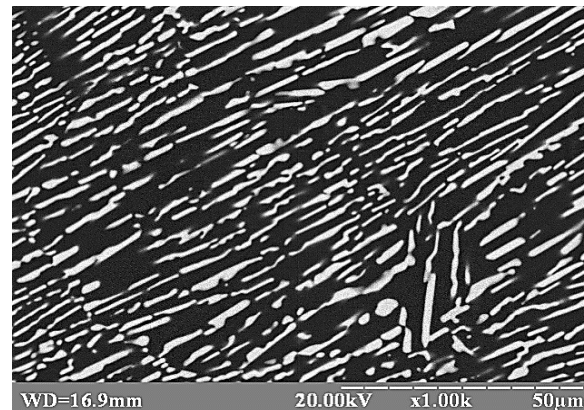
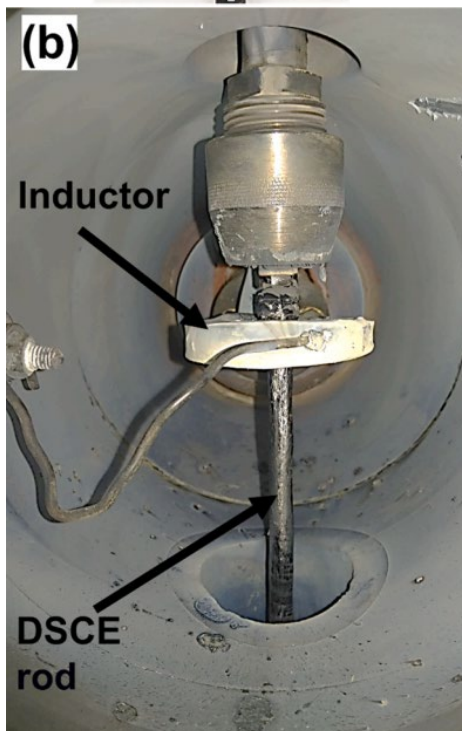
## Мікроструктура сплавів системи $B_4C-(Ti_xZr_{1-x})B_2$



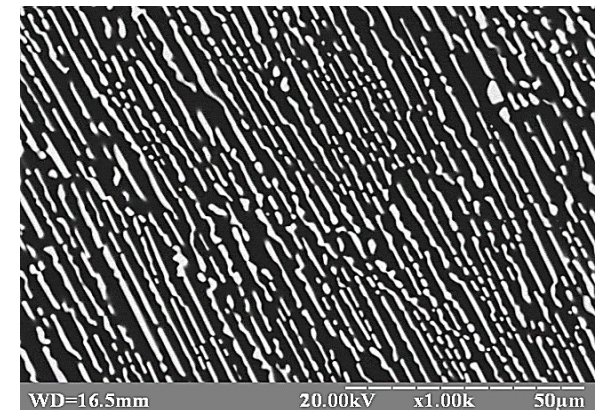
$B_4C-(Ti_{0.8}Zr_{0.2})B_2$



$B_4C-(Ti_{0.6}Zr_{0.4})B_2$

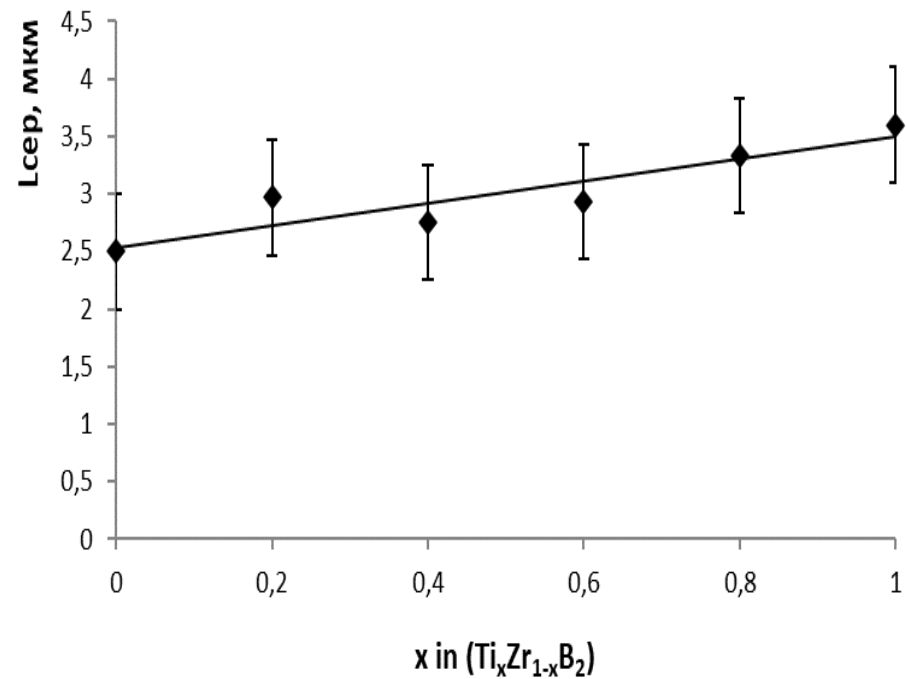
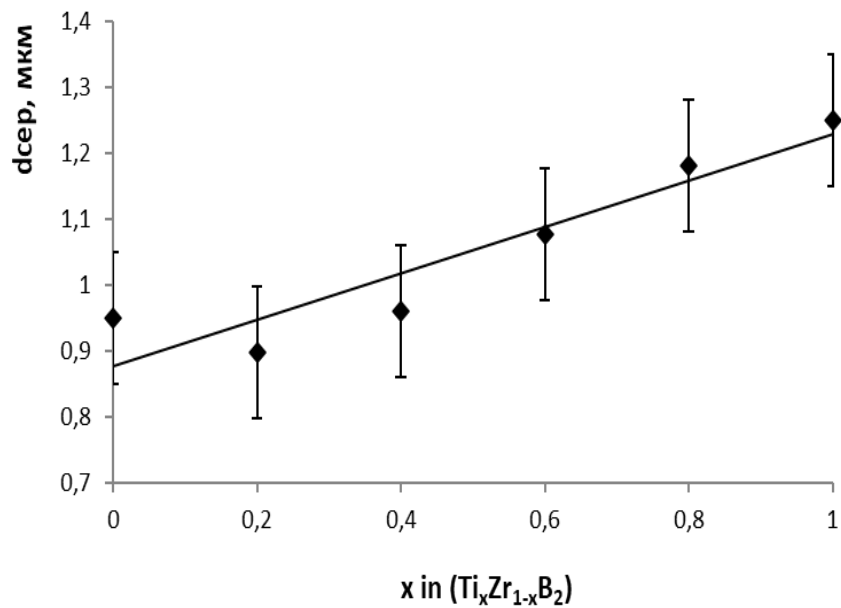


$B_4C-(Ti_{0.4}Zr_{0.6})B_2$

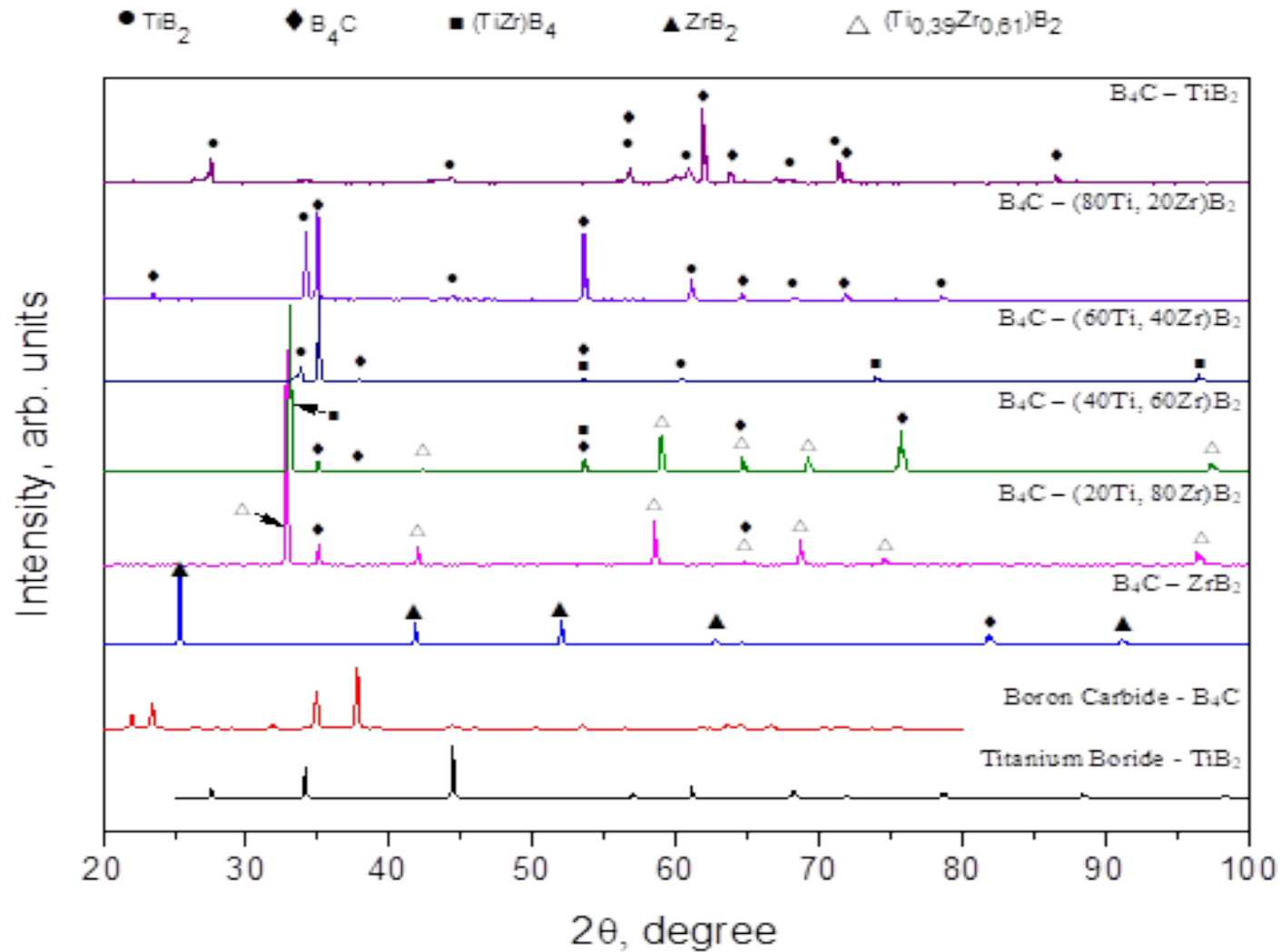


$B_4C-(Ti_{0.2}Zr_{0.8})B_2$

# Розмір і міжфазна відстань, у композитах $B_4C-(Ti_xZr_{1-x})B_2$

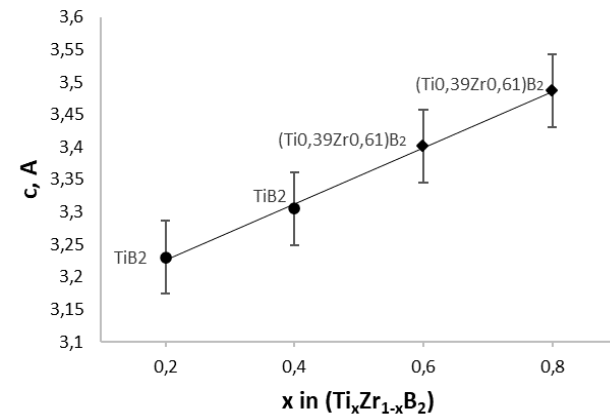
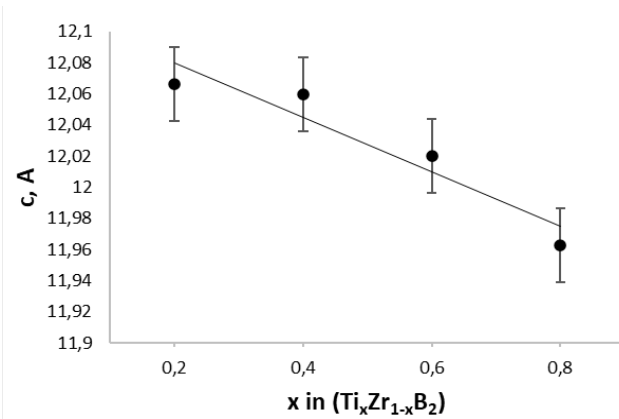
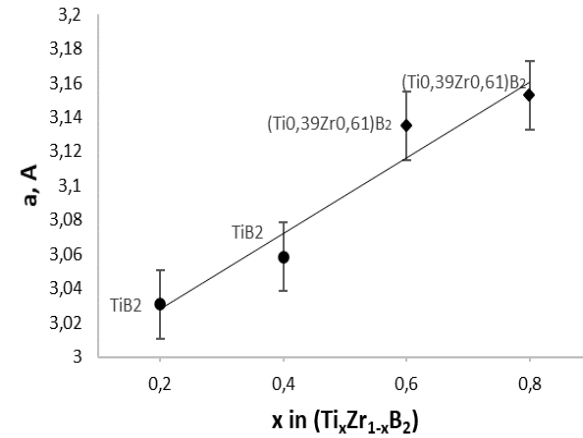
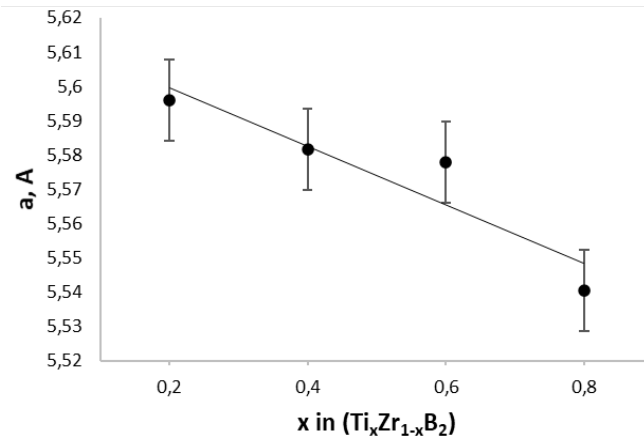


# Фазовий склад композитів $B_4C-(Ti_xZr_{1-x})B_2$





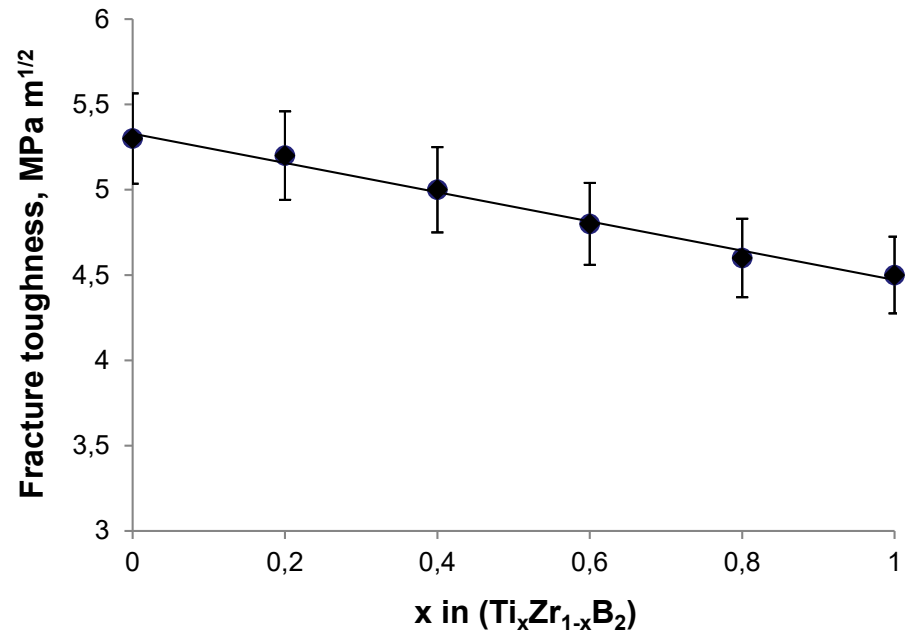
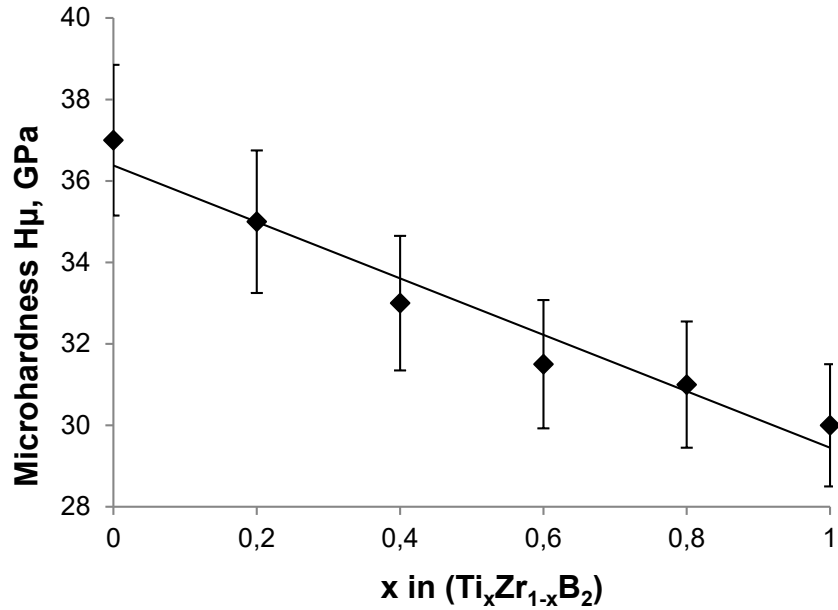
# Міжатомна відстань у композитах $B_4C-(Ti_xZr_{1-x})B_2$



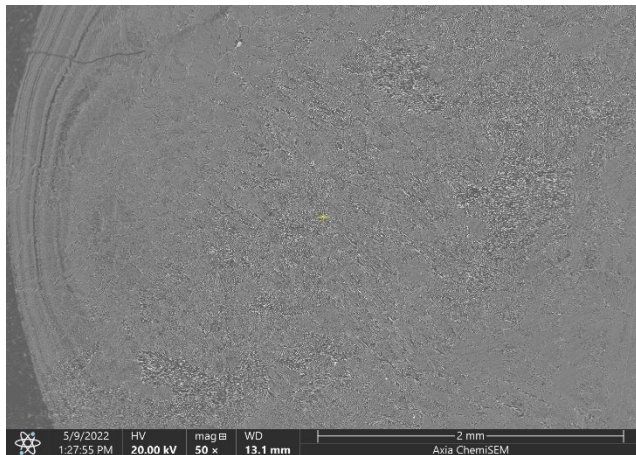
$B_4C$

$(Ti_xZr_{1-x})B_2$

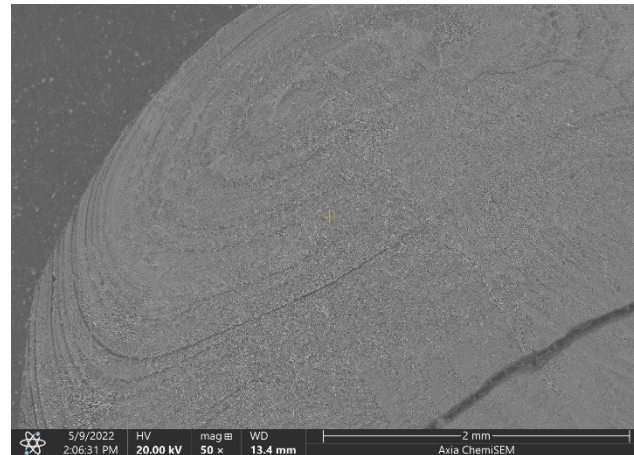
# Мікромеханічні властивості композитів $B_4C-(Ti_xZr_{1-x})B_2$



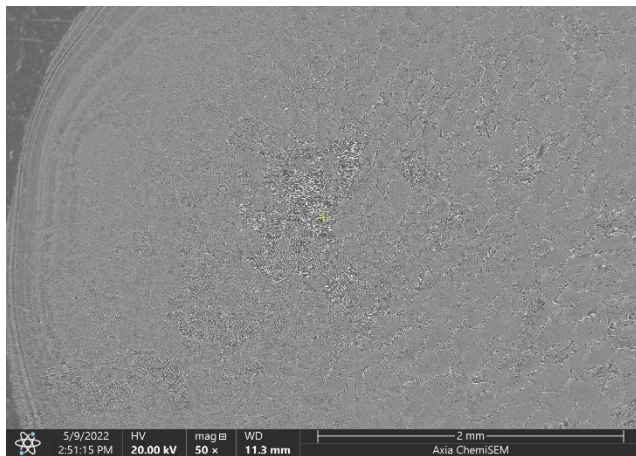
# Макроструктура композиту $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$



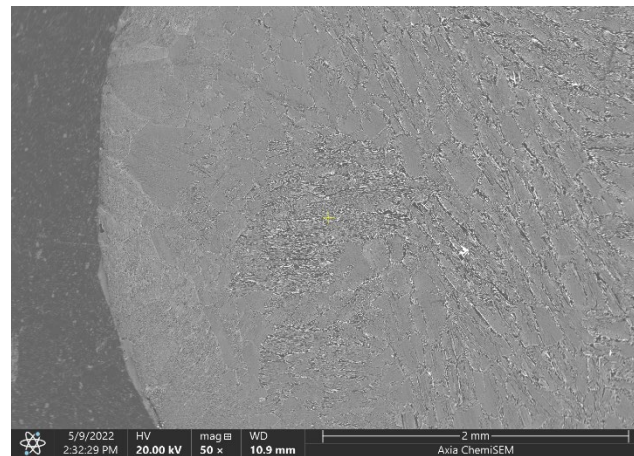
**1 mm/min**



**2 mm/min**

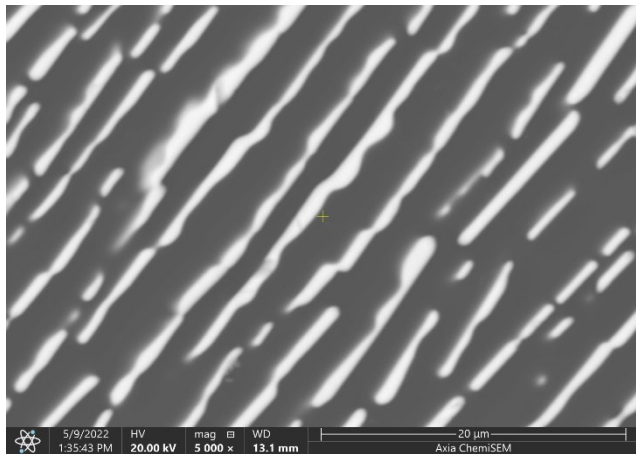


**3 mm/min**

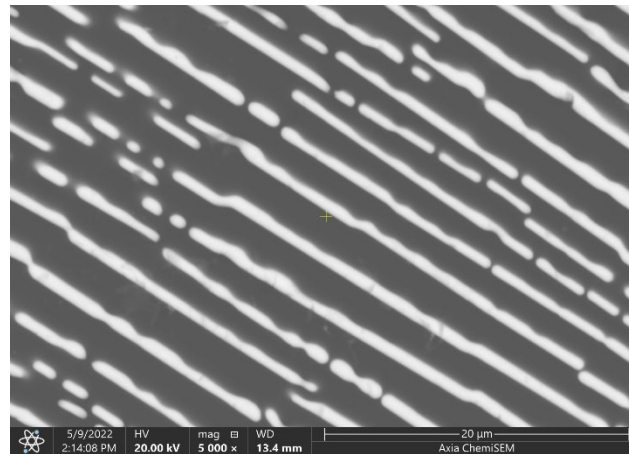


**4 mm/min**

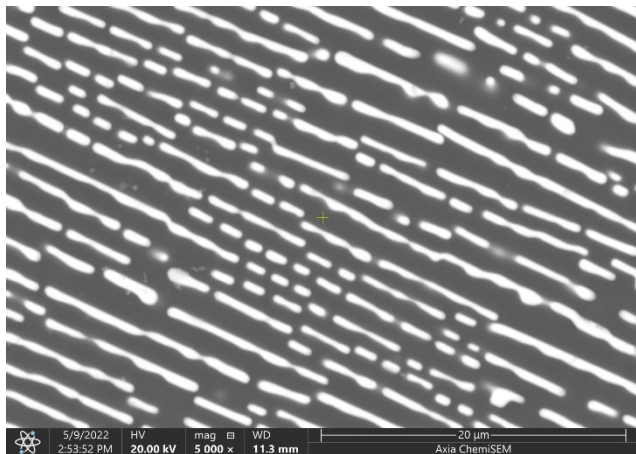
# Мікроструктура поперечного перетину композиту $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$



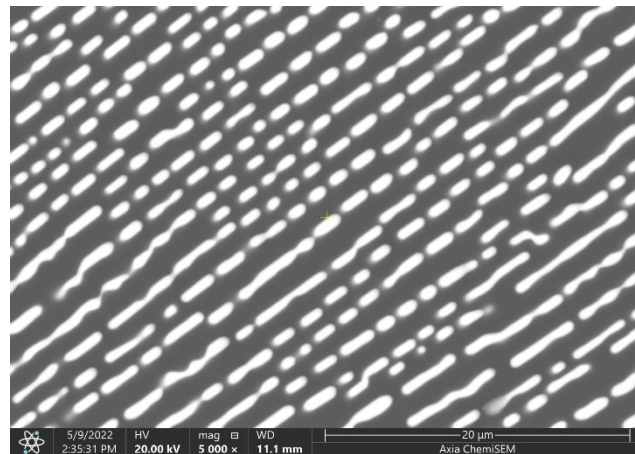
1 mm/min



2 mm/min

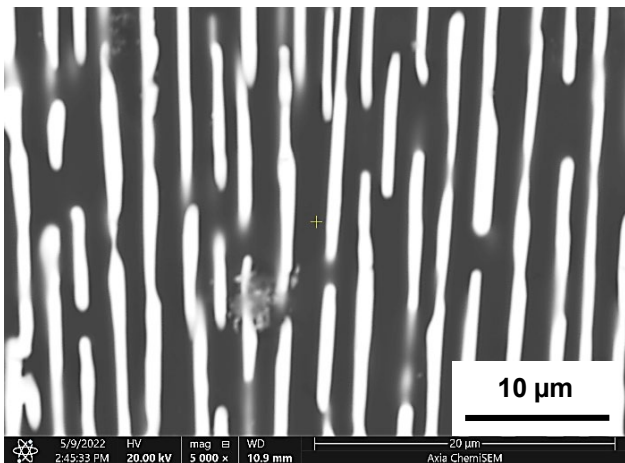


3 mm/min

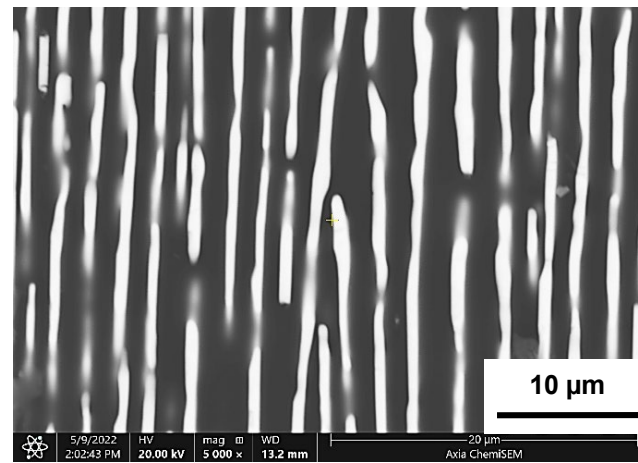


4 mm/min

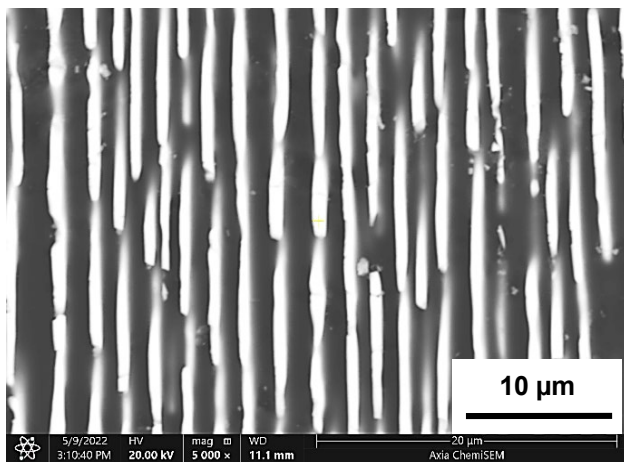
# Мікроструктура поздовжнього перетину композиту $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$



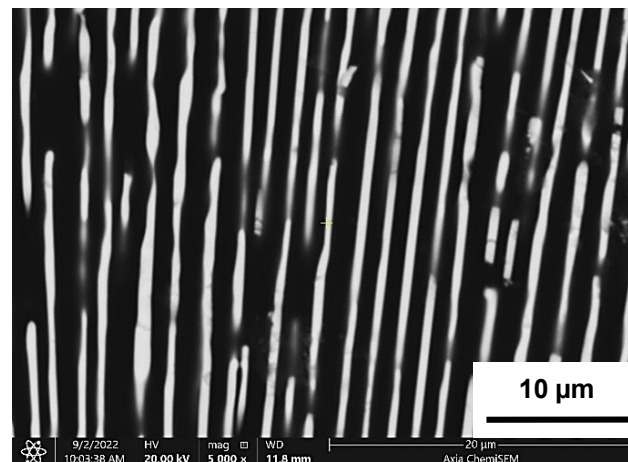
1 mm/min



2 mm/min



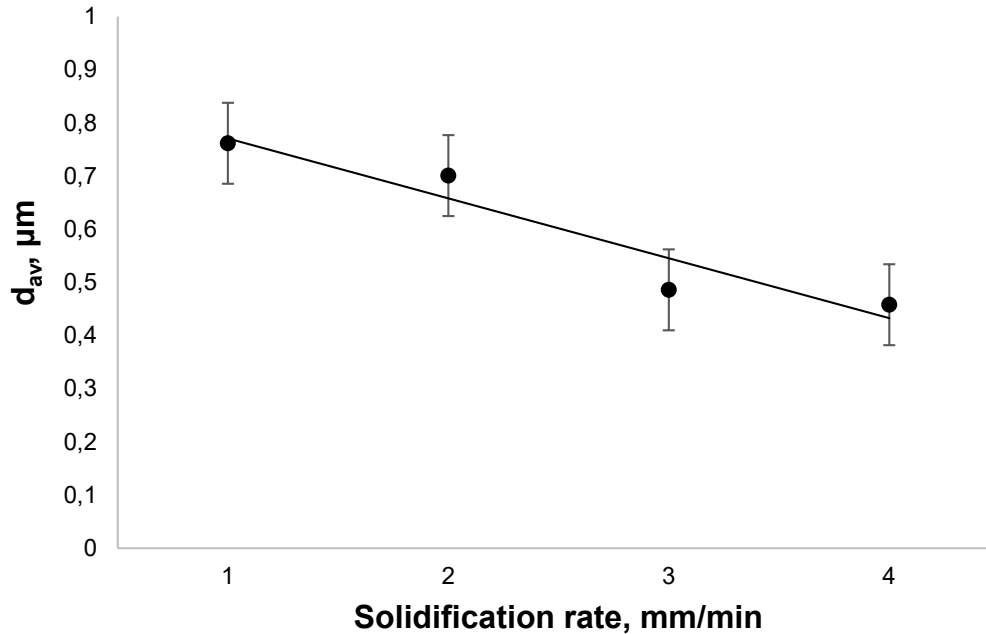
3 mm/min



4 mm/min

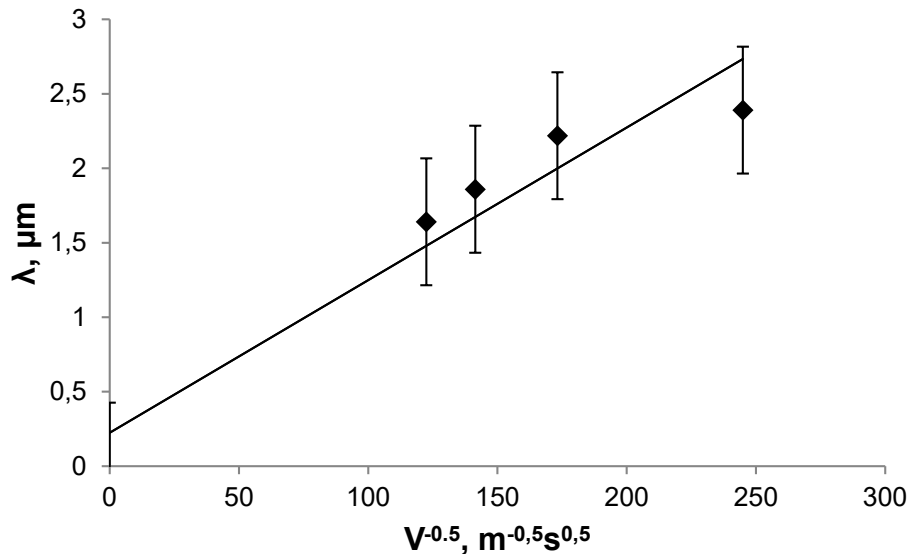
Growth direction

# Мікроструктурні параметри композиту $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$



$$\lambda^2 V = A$$

$$A = 1.53 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s}$$



$B_4C-TiB_2$  :

$9.52 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3/\text{s}$

[I. Bogomol et al, Room and high temperature toughening in directionally solidified  $B_4C-TiB_2$  eutectic composites by Si doping, J. Alloy. Compd. 570 (2013) 94–99]

$8.6 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3/\text{s}$

[I. Gunjishima, T. Akashi, T. Goto, Characterization of directionally solidified  $B_4C-TiB_2$  composites prepared by a floating zone method, Mater. Trans. 43 (2002) 712–720]

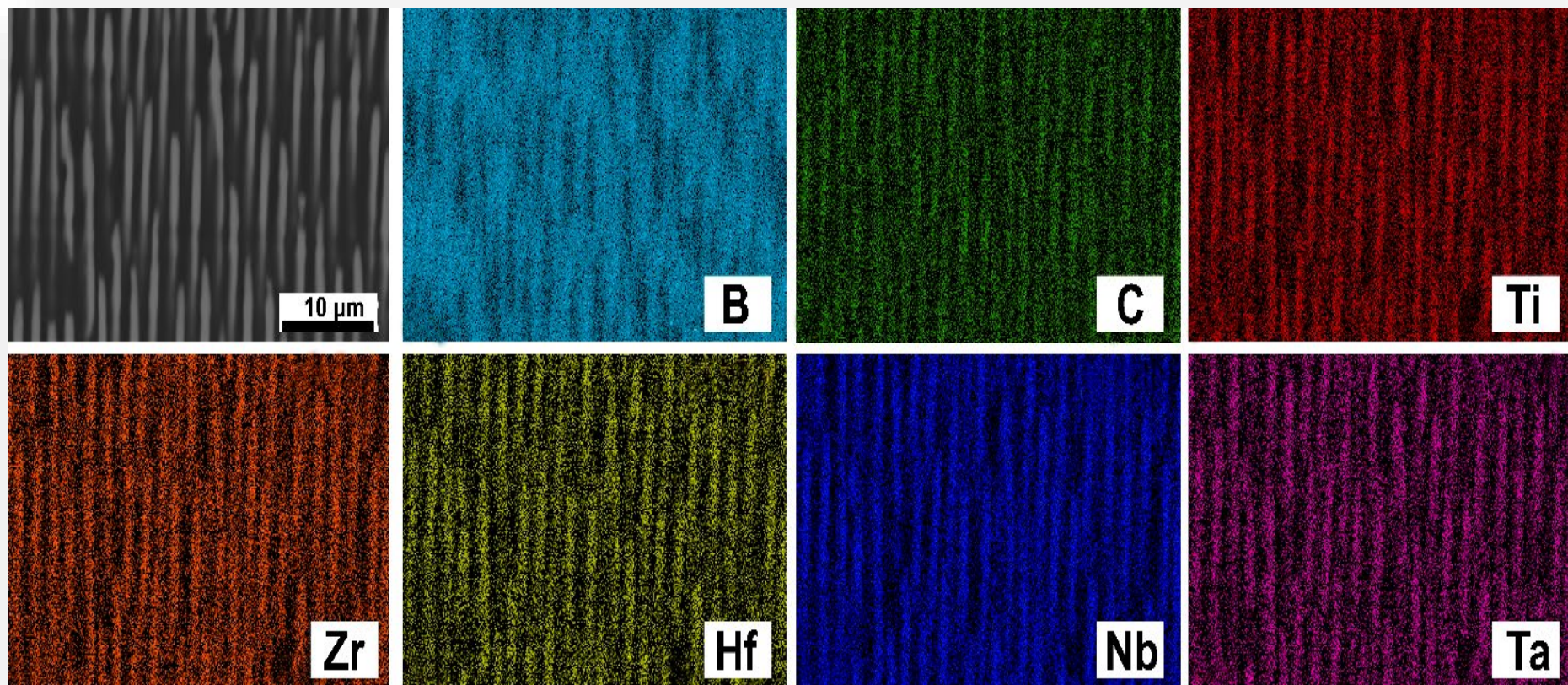
$8.81 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3/\text{s}$

[A.V. Polotai, J.F. Foreman, E.C. Dickey, Laser surface processing of  $B_4C-TiB_2$  eutectic, Int. J. Appl. Ceram. Technol. 5 (6) (2008) 610–617]

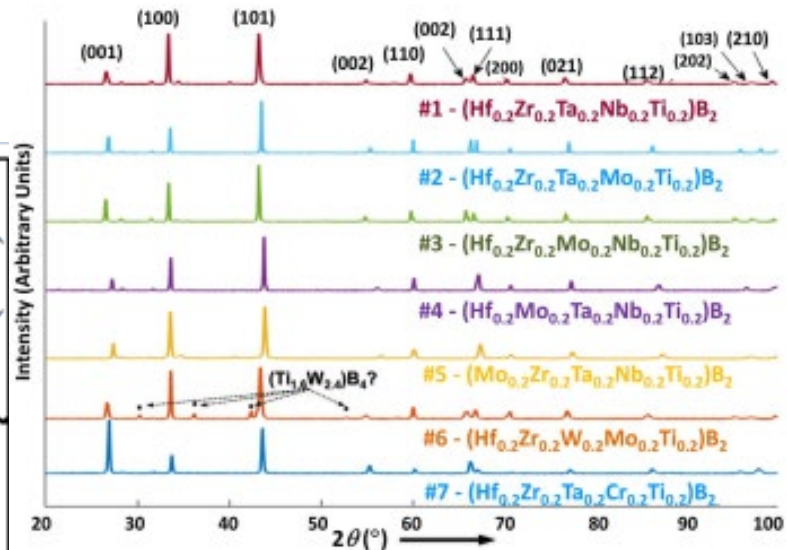
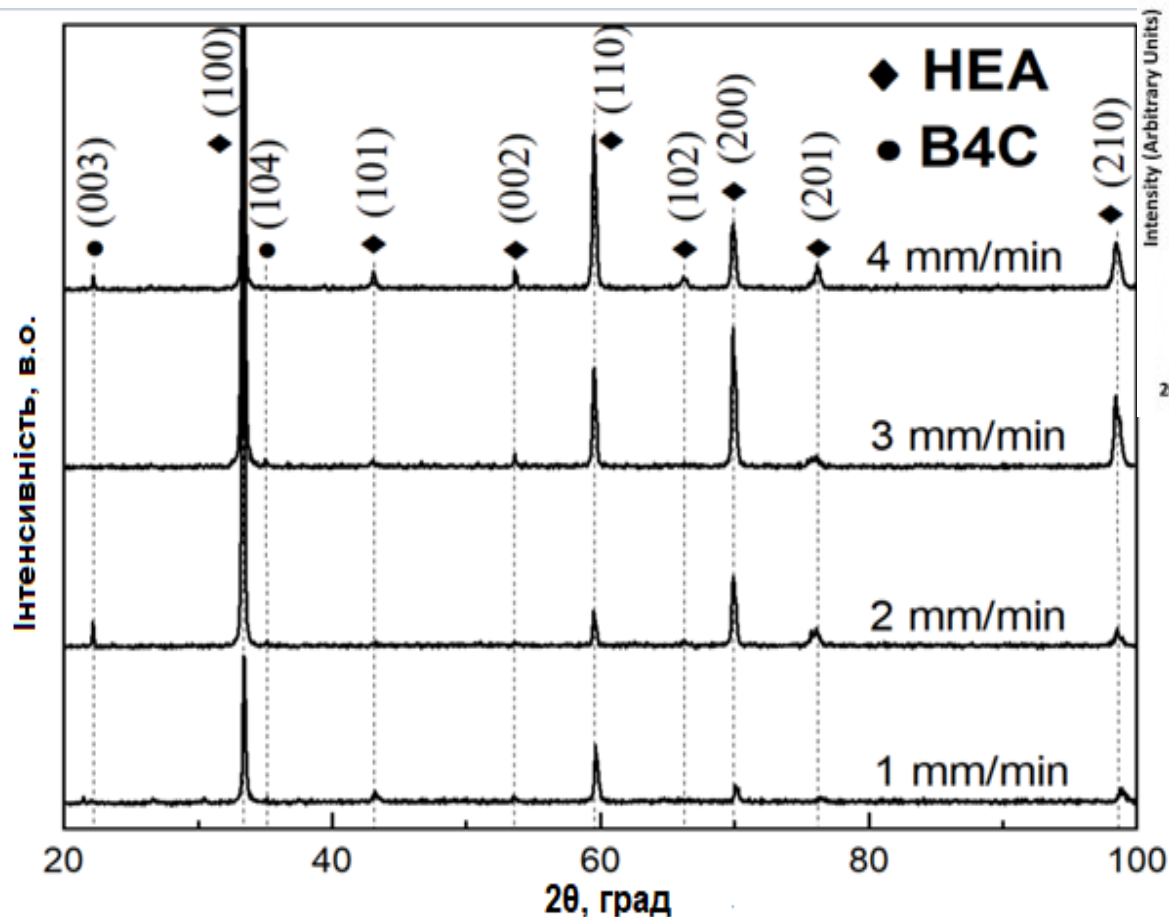
$7.773 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3/\text{s}$

[R.M. White, J.M. Kunkle, A.V. Polotai, E.C. Dickey, Microstructure and hardness scaling in laser-processed  $B_4C-TiB_2$  eutectic ceramics, J. Eur. Ceram. Soc. 31 (2011) 1227–1232].

# EDX дослідження композиту $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$



# РФА $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$

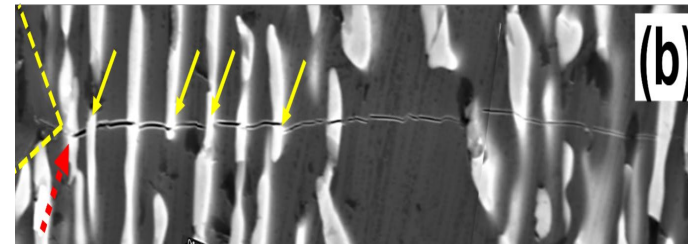
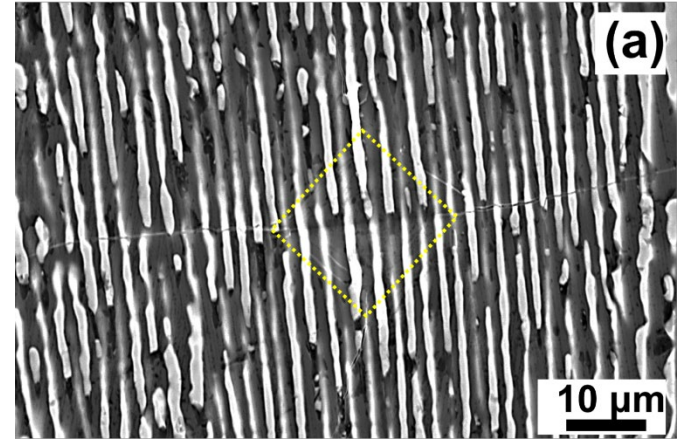
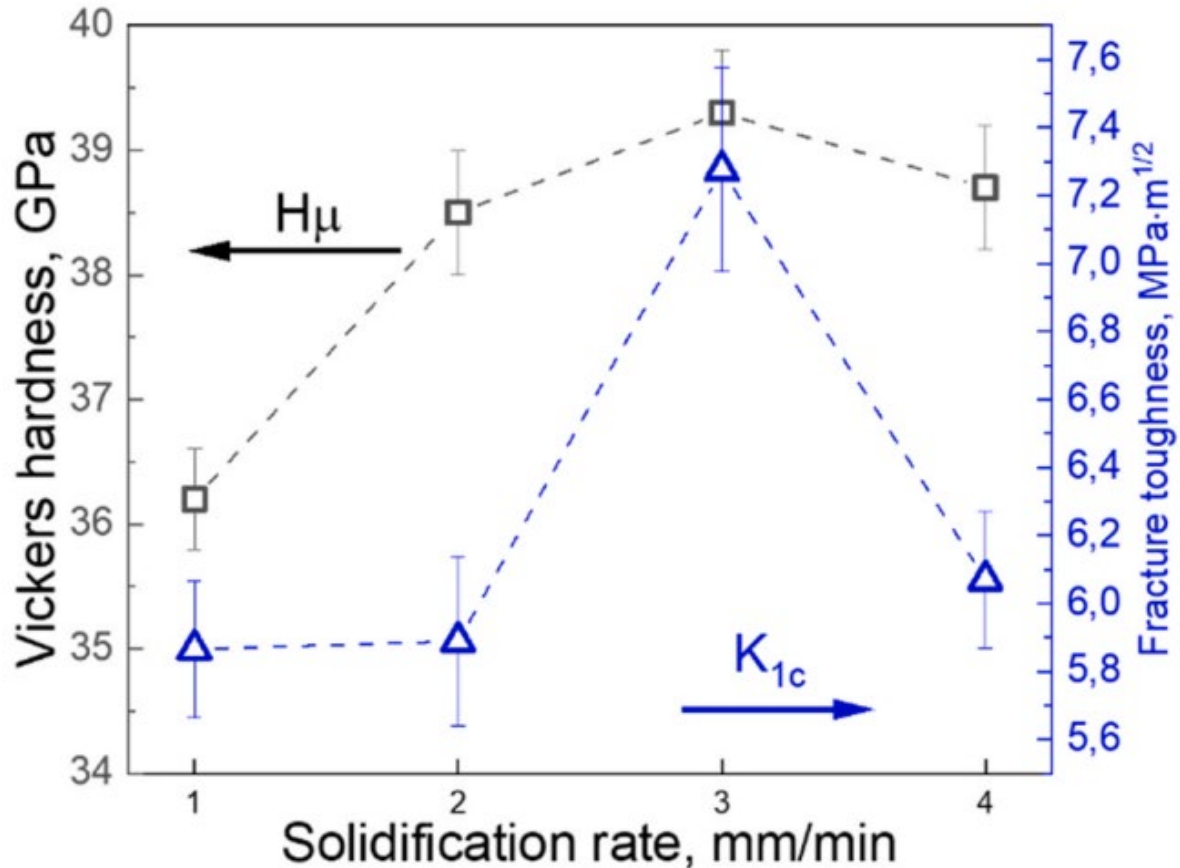


Gild et.al. High-Entropy Metal Diborides: A New Class of High-Entropy Materials and a New Type of Ultrahigh Temperature Ceramics / Scientific Reports | 6:37946 | DOI: 10.1038/srep37946

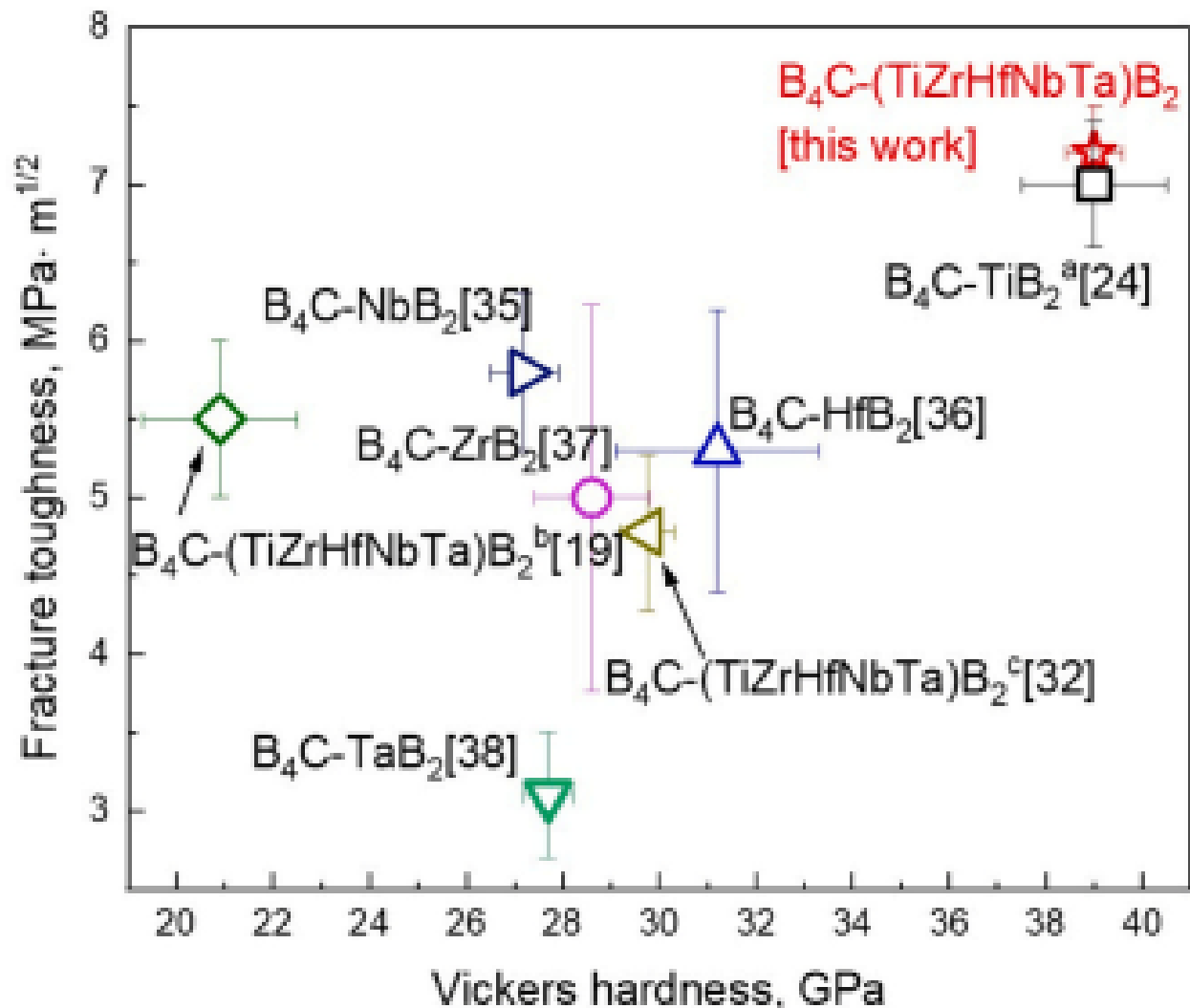
Phase		Solidification rate (mm/min)			
		1	2	3	4
$B_4C$	a (Å)	5.650	5.650	5.650	5.650
	c (Å)	12.029	12.000	11.964	11.914
$(Ti_{0.2}Zr_{0.2}Hf_{0.2}Nb_{0.2}Ta_{0.2})B_2$	a (Å)	3.101	3.101	3.101	3.101
	c (Å)	3.386	3.359	3.358	3.347

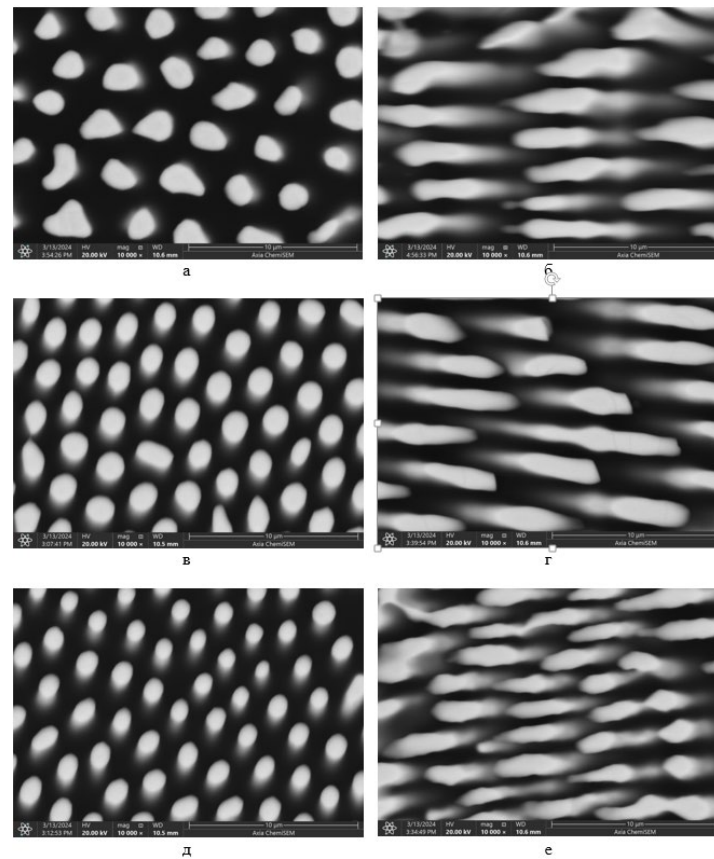
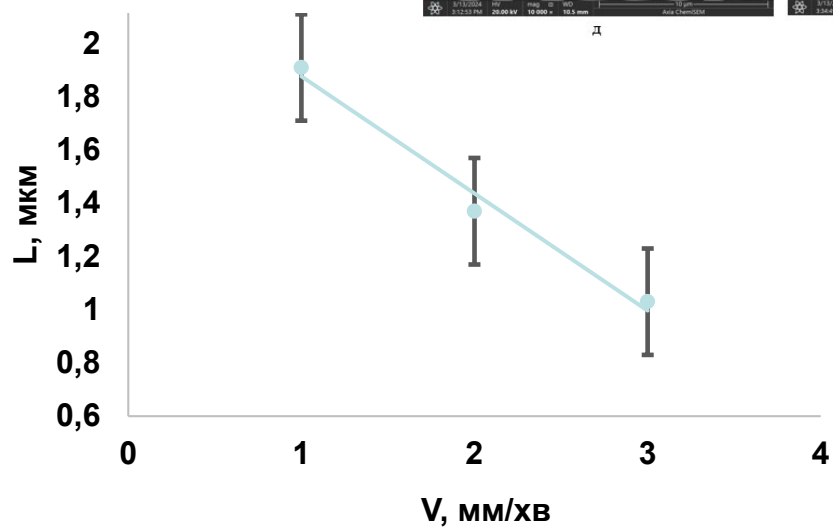
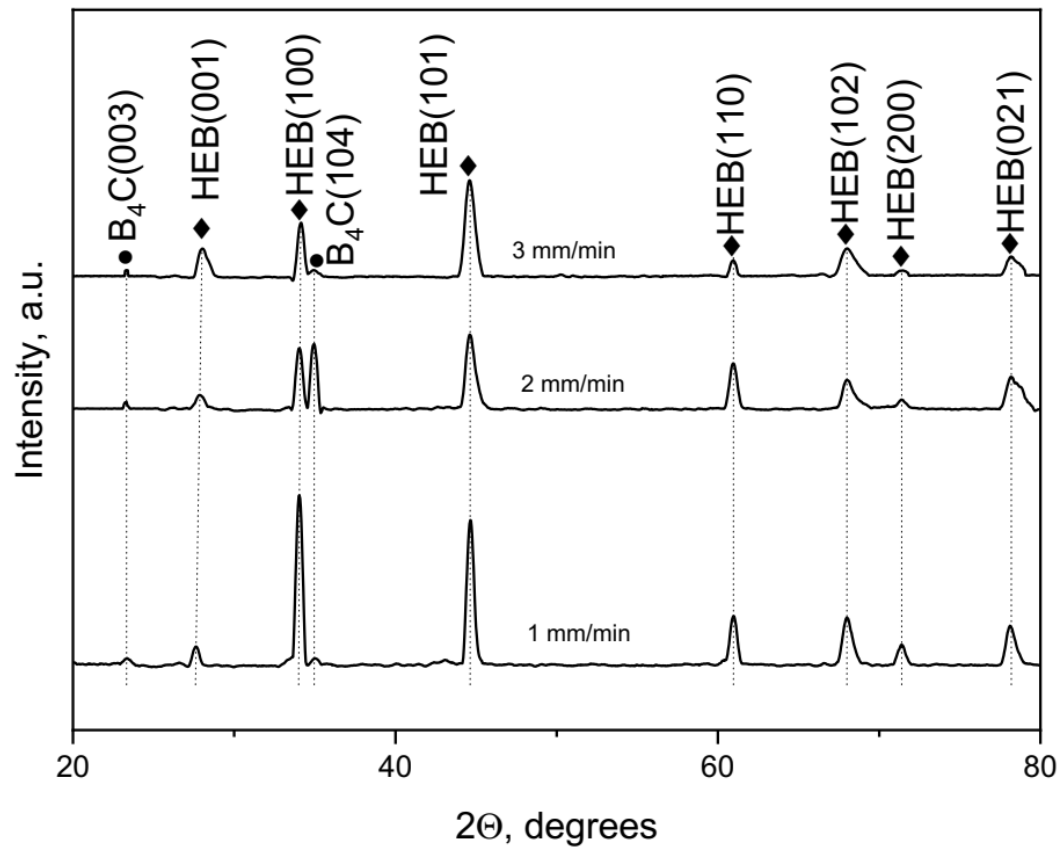


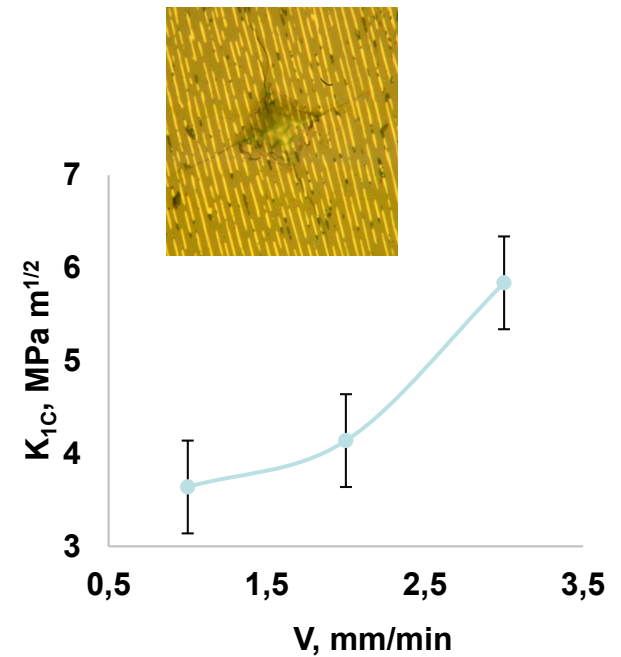
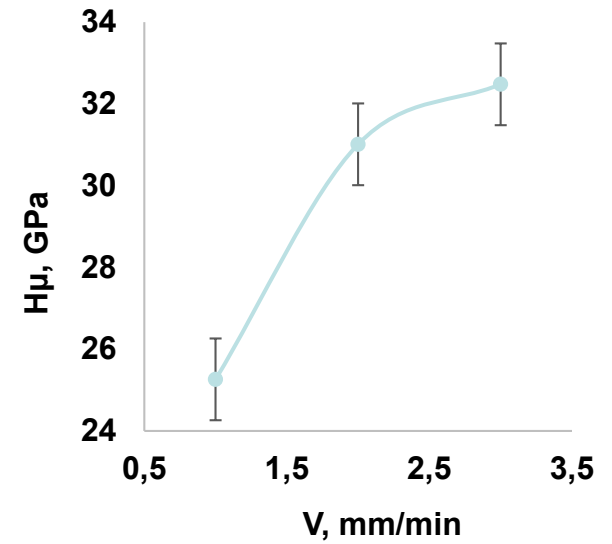
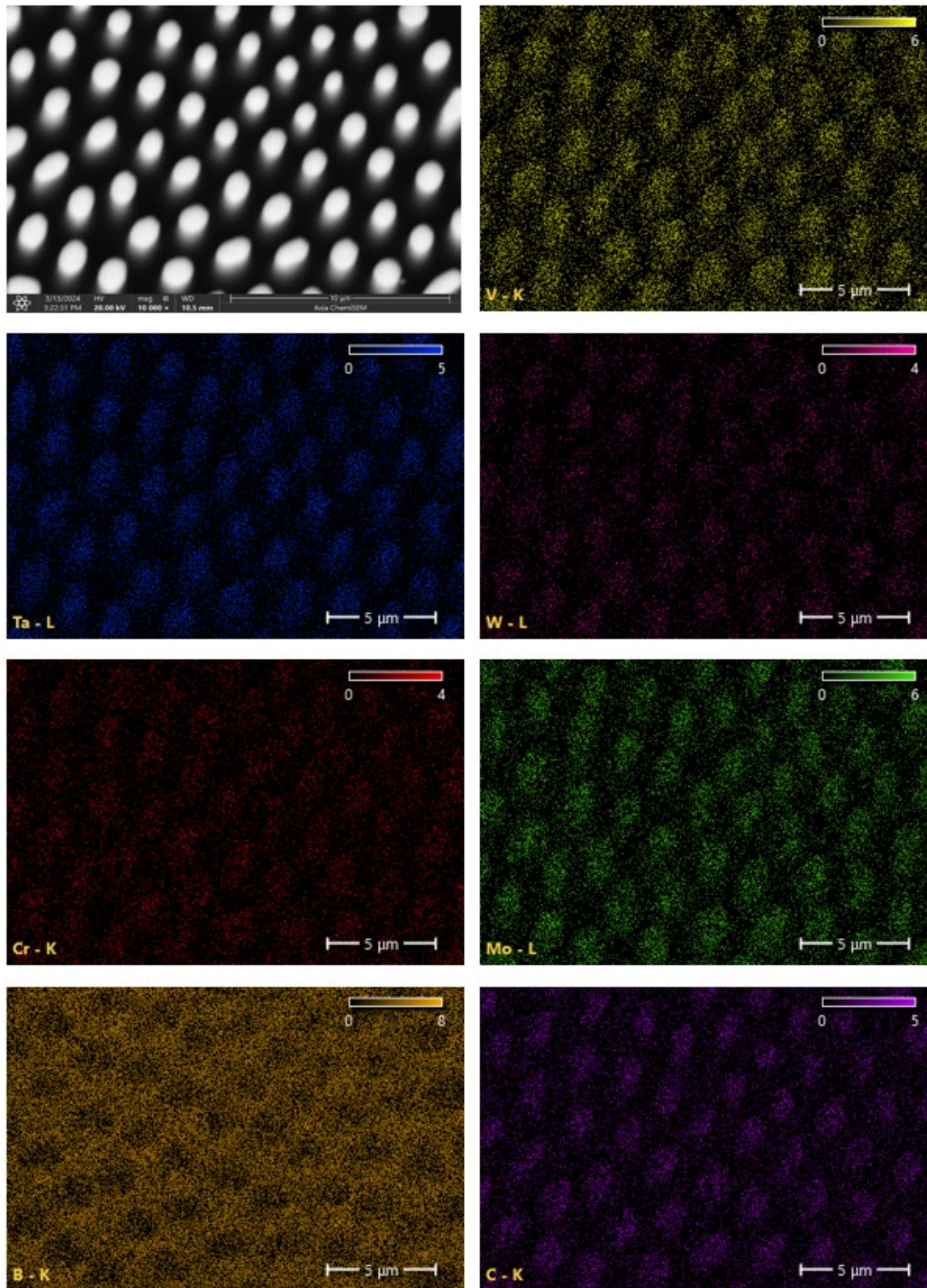
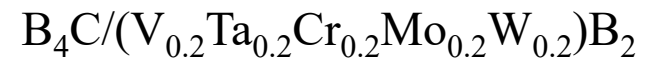
# Мікромеханічні властивості композиту $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$



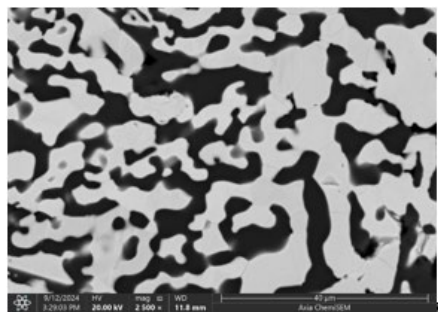
# Порівняльна діаграма: твердість-тріщиностійкість для сплавів системи $B_4C$ - $MeB_2$



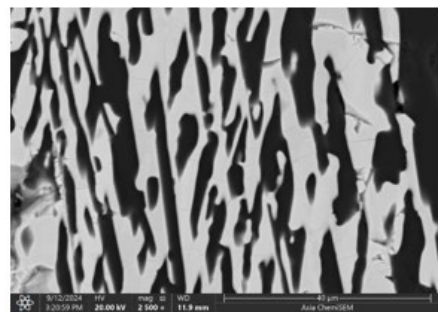




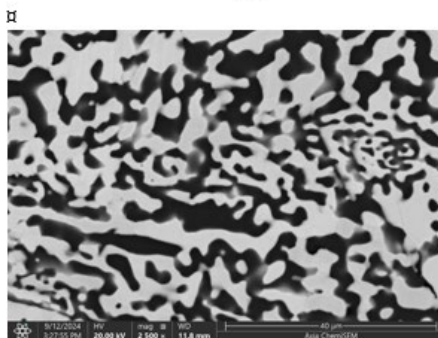
# Спрямовано закристалізований евтектичний сплав $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$



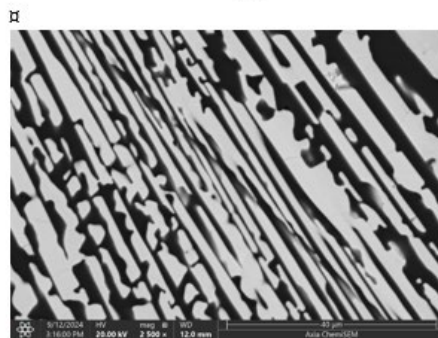
a



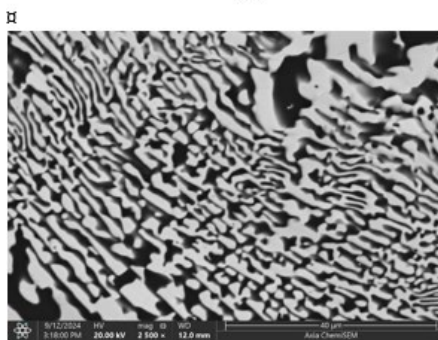
б



в



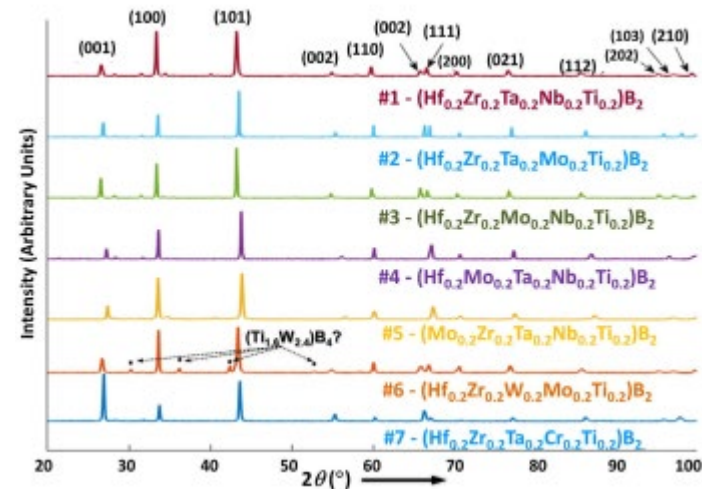
г



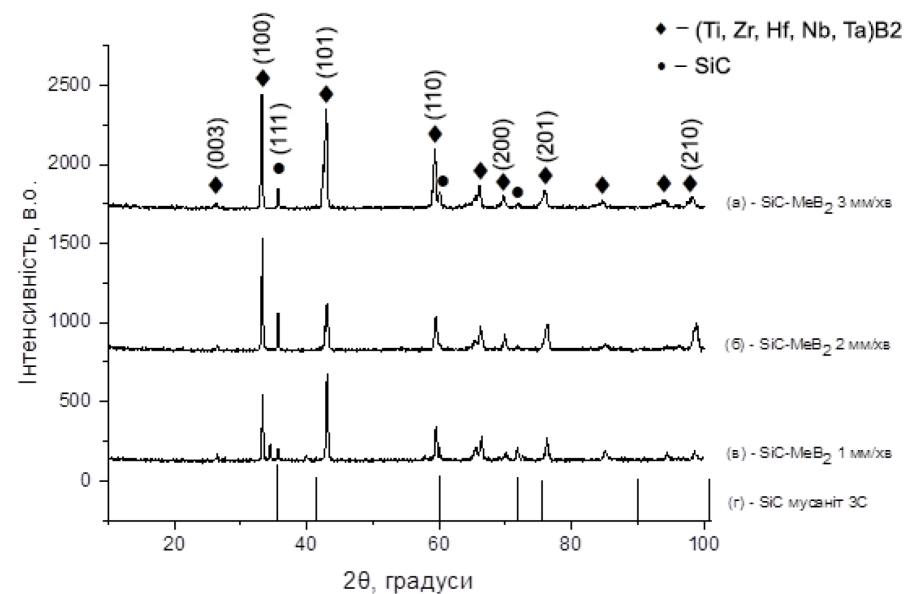
д



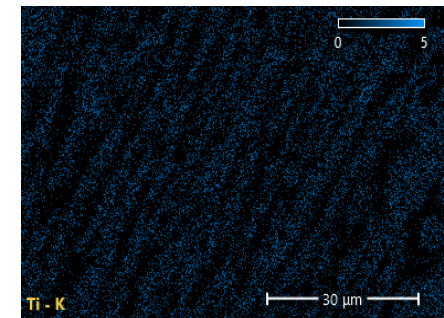
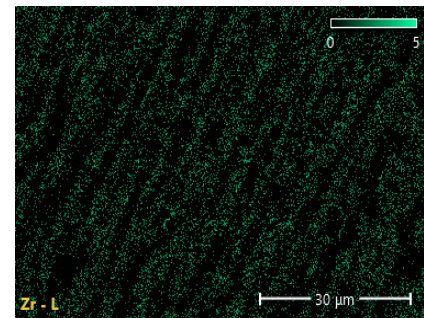
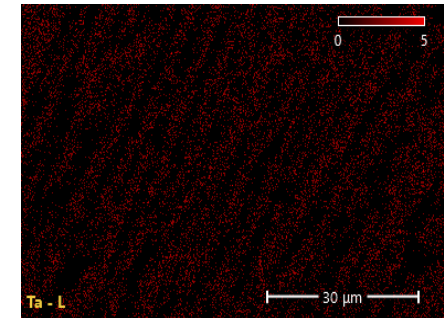
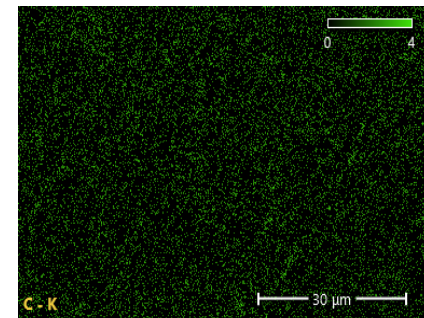
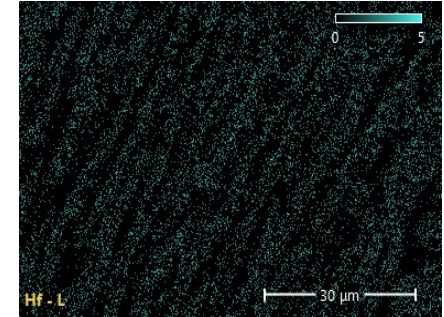
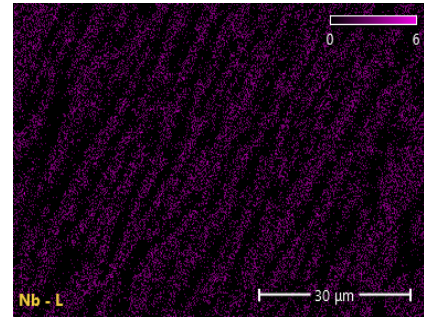
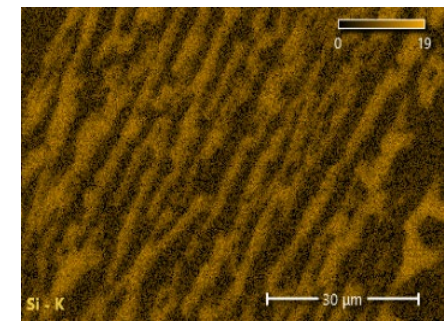
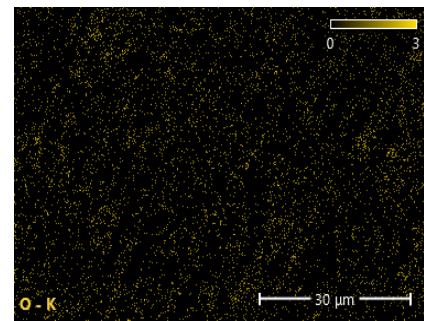
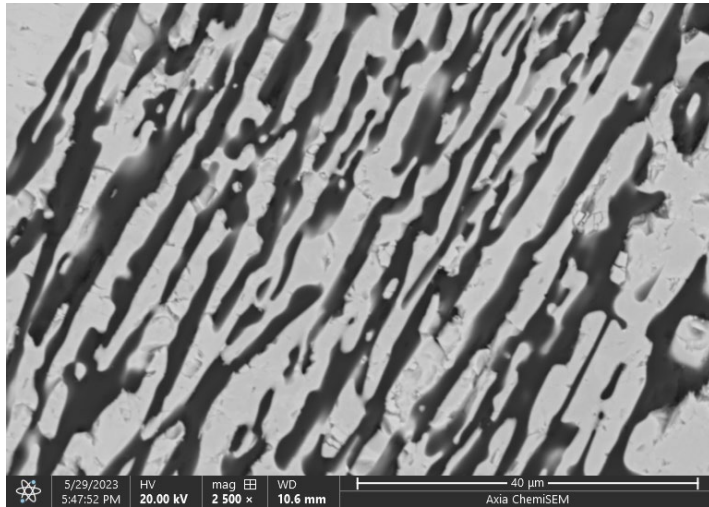
е



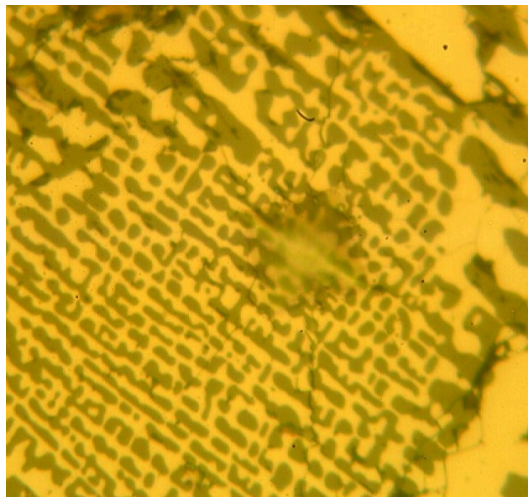
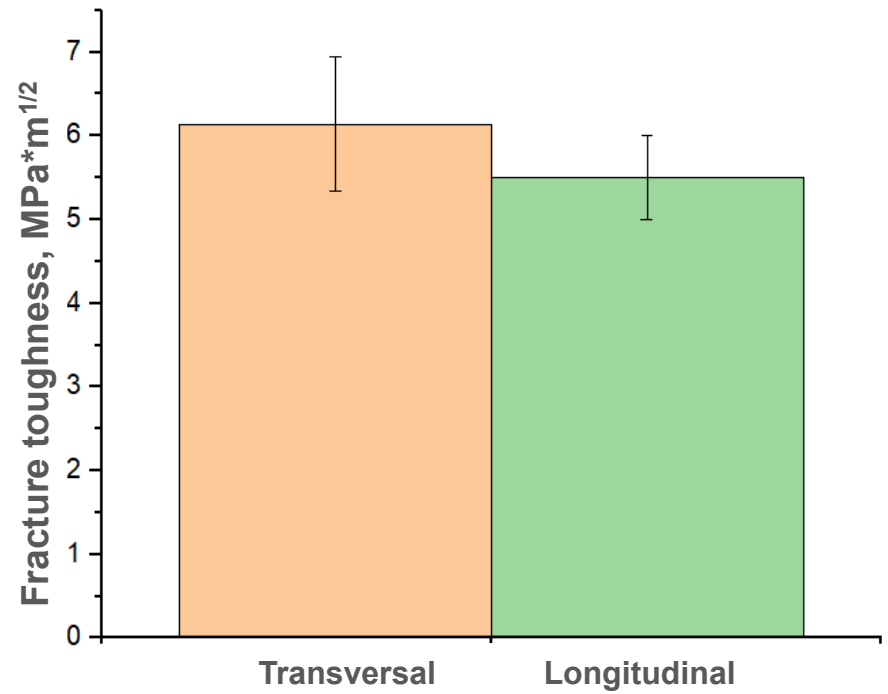
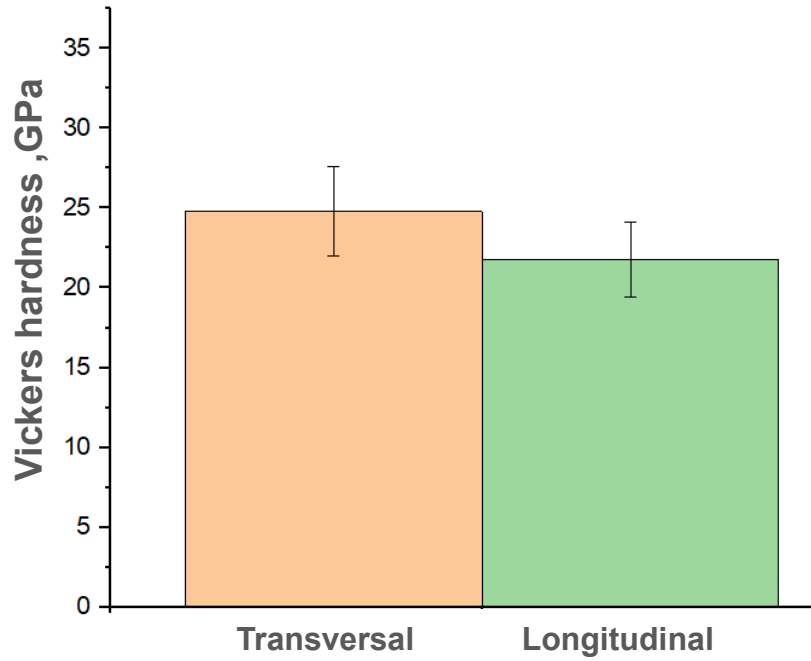
Gild et.al. High-Entropy Metal Diborides: A New Class of High-Entropy Materials and a New Type of Ultrahigh Temperature Ceramics / Scientific Reports | 6:37946 | DOI: 10.1038/srep37946



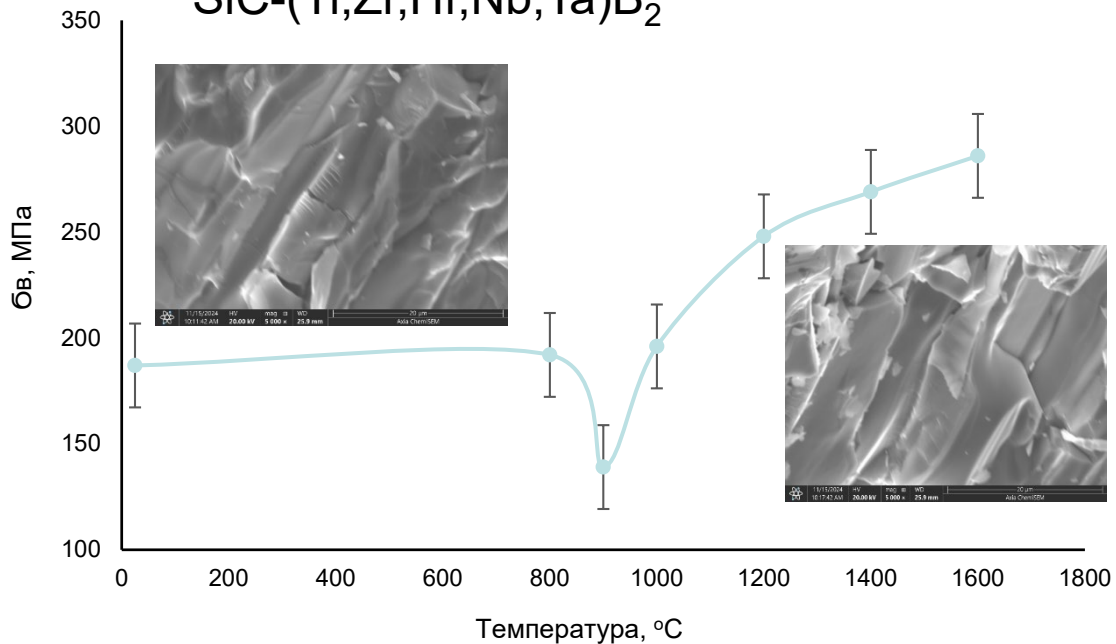
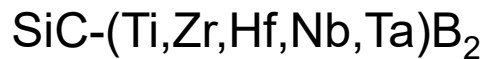
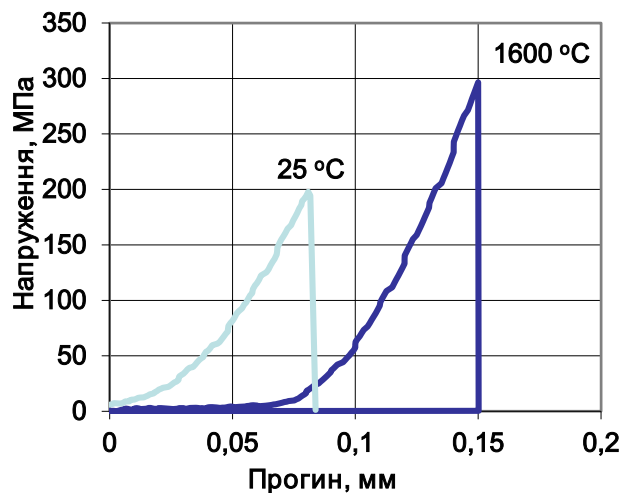
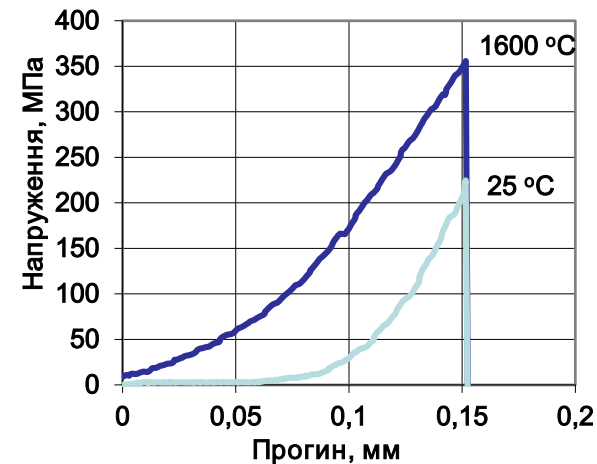
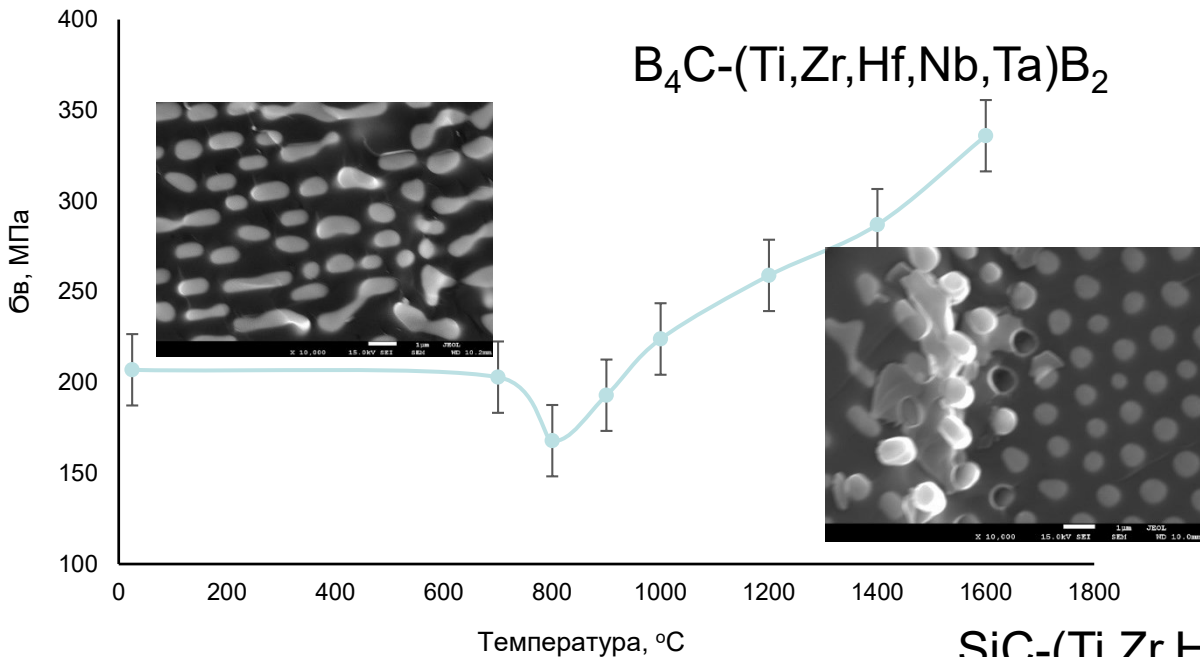
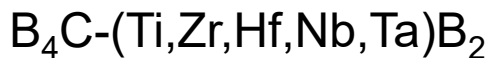
# EDX дослідження композиту $\text{SiC}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$



# Мікромеханічні властивості композиту SiC-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub>



# Температурні залежності міцності на згин спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів





## Статті:

1. Ферхатлі Е.Р., Ковальська А.В., Богомол Ю.І. Мікроструктура та мікромеханічні властивості спрямовано закристалізованих сплавів системи  $\text{W}_4\text{C}-(\text{Ti}_x\text{Zr}_{1-x})\text{B}_2$  / Надтверді матеріали. №2, 2022, С. 50-57. <http://www.ism.kiev.ua/stm/index.php?i=158> (Scopus Q3).
2. I. Solodkyi, S. Teslia, O. Bezdorozhev, I. Trosnikova, O.Yurkova, I. Bogomol, P. Loboda Hardmetals prepared from WC-W<sub>2</sub>C eutectic particles and AlCrFeCoNiV high entropy alloy as a binder, Vacuum, *Volume 195*, 2022, 110630. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0042207X21005789?via%3Dihub> (Scopus Q1).
3. Упатов М.І., Єфіменко М.Ю., Влегуєлс Д., Богомол Ю.І. Спрямовано закристалізований трифазний евтектичний композит системи  $\text{W}_4\text{C}-\text{TaB}_2-\text{SiC}$  / Надтверді матеріали. №1, 2022, С. 27-35. <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063457622010087> (Scopus Q3).
4. S. Teslia, I. Solodkyi, O. Bezdorozhev, O.Yurkova, I. Bogomol, P. Loboda Phase compatibility in (WC-W<sub>2</sub>C)/AlFeCoNiCrTi composite produced by spark plasma sintering. Journal of Alloys and Compounds, Volume 921, 2022, P. 166042. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838822024331?via%3Dihub> (Scopus Q1).
5. The Structure and Mechanical Properties of WC–8 wt.% Co Hardmetal Produced by Cold and Hot Isostatic Pressing / G.Ya. Akimov, I.V. Andreev, V.I. Sheremet, I.Yu. Trosnikova, P.I. Loboda, T.O. Kosenchuk // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2022. – Vol. 61. – № 1-2. – P. 9-17. 10.1007/s11106-022-00290-0 (Scopus Q3).
6. Julia Becker, Danio Breuer, Iurii Bogomol, Manja Krüger Enhanced fracture toughness and high-temperature strength of directionally solidified Mo-XC alloys. Crystals, 12, 2022, P. 1534. <https://www.mdpi.com/2073-4352/12/11/1534/htm> (Scopus Q2).
7. Дуань Маньтан, Солодкий Є.В., Богомол Ю.І. Стан та перспективи розвитку досліджень по виготовленню високоентропійної боридної кераміки (Огляд) // Надтверді матеріали, №6, 2023, С. 37-48. (Mantang Duan, I. V. Solodkyi, and Y. I. Bogomol Recent Advancements in the Synthesis of High-Entropy Boride Ceramics: A Review / Journal of Superhard Materials, 2023, Vol. 45, No. 6, pp. 434–443.) <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063457623060023> (Scopus Q3).
8. Effect of thermal motion of transverse domain wall on thermodynamic states of cylindrical iron nanowire Shevchenko A.B., Barabash M.Yu., Oliinyk O.V., Stepanov O.V. *Results in Physics. Volume 44*, 2023, 106133. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2022.106133> (Scopus Q2).
9. S.Yu. Teslia, O.S. Kucher, I.I. Bogomol, P.I. Loboda, and I.V. Solodkyi Induction zone sintering of WC–8Co hard alloy. Materials Science, Vol. 59, No. 5, 2024, P. 638-643. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00821-7> (Scopus Q3).
10. Iurii Bogomol, Elmira Ferkhatly, Serhii Ponomarchuk, Yaroslav Zaulychnyi, Myroslav Karpets, Ievgen Solodkyi Ceramic Eutectic Composites Based on  $\text{W}_4\text{C}$  Directionally Reinforced by High-entropy (TiZrHfNbTa)<sub>2</sub>B<sub>2</sub> boride Journal of the European Ceramic Society. Volume 44, Issue 1, 2024, P. 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.08.028> (Scopus Q1).
11. Hülya Biçer, Mustafa Tuncer, Hasan Göçmez, Iurii Bogomol, Valerii Kolesnichenko, and Andrey Ragulya Spark Plasma Sintering of Boron Carbide Using Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> as a Sintering Additive / Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, 2024, Volume 39, pages 645–650. <https://doi.org/10.1007/s11595-024-2921-72921-7> (Scopus Q3).
12. Резнік Д.О., Палагеча Д.Л., Кривенко К.В., Пономарчук С.Г., Зауличний Я.В., Степанов О.В., Леонов Д.С., Богомол Ю.І. Керамічний композит на основі карбиду бору спрямовано армований на мезорівні високоентропійним диборидом перехідних металів / Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології (Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii) 2024, т. 22, № 2, С. 249–260. <https://doi.org/10.15407/nnn.22.02.249>, [https://www.imp.kiev.ua/nanosys/media/pdf/2024/2/nano\\_vol22\\_iss2\\_2024.pdf](https://www.imp.kiev.ua/nanosys/media/pdf/2024/2/nano_vol22_iss2_2024.pdf) (Scopus Q4).
13. Effect of Cold Isostatic Pressing and VC Grain Growth Inhibitor Addition on WC Grain Size and Mechanical Properties of WC-8Co Cemented Carbide / G.Ya. Akimov, V.I. Sheremet, I.V. Andreev, I.Yu. Trosnikova, T.O. Kosenchuk, P.I. Loboda // Journal of Mechanical Engineering. – 2024. – Vol. 21. – № 2. – P. 23-35. 10.24191/jmeche.v21i2.26252 (Scopus Q4)
14. Cold Isostatic Pressing Effect on the WC-15 wt.% Co Hard Alloy Strength / V.I. Sheremet, G.Ya. Akimov, I.V. Andreev, I.Yu. Trosnikova, P.I. Loboda // Strength of Materials. – 2024. – Vol 56. – № 3. – P. 551-558. 10.1007/s11223-024-00670-4 (Scopus Q4)
15. Дуань Маньтан, В.Т. Мосяк, Д.Л. Палагеча, К.В. Кривенко, С.Г. Пономарчук, Д.О. Резнік, Я.В. Зауличний, О.В. Степанов, Д.С. Леонов, М.Ю. Барабаш, Ю.І. Богомол Структура та властивості композиційного матеріалу на основі карбиду кремнію армованого на мезорівні високоентропійним диборидом / Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології (Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii) 2024, т. 22, № 4, С. 1001-1013. <https://doi.org/10.15407/nnn.22.04.1001>, <https://www.imp.kiev.ua/nanosys/en/articles/index.html> (Scopus Q4).
16. Ya. Zaulychnyy, E. Bolen, M. Karpets, S. Petrovska, O. Khyzhun, E. Deligoz and H. Ozisik Transformation of bonds and redistribution of partial states of valence electrons at  $\alpha(\text{C}23)\text{-WGe}_2 \rightarrow \beta(\text{C}11b)\text{-WGe}_2$  high-pressure polymorphic transformation. Physica Scripta, №98, (2023), P. 055936. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1402-4896/accc5d> (Scopus Q2).
17. Mantang Duan, Iurii Bogomol SiC-(Ti<sub>0.2</sub>Zr<sub>0.2</sub>Hf<sub>0.2</sub>Nb<sub>0.2</sub>Ta<sub>0.2</sub>)B<sub>2</sub> composite ceramics prepared by fast hot-press sintering. Journal of the Australian Ceramic Society, 2024, under review.

# Публікації

## Патенти:

1. Заявка на видачу патенту на винахід а2023 04888 від 17.10.2023 Високотемпературний композиційний сплав на основі карбиду бору. Богомол Ю.І., Ферхатли Е.Р., Пономарчук С.Г., Троснікова І.Ю.
2. Заявка на видачу патенту на корисну модель № у 2024 04866 Спосіб отримання композиційного матеріалу на основі карбиду бору армованого високоентропійним боридом Богомол Ю.І., Резнік Д.О., Пономарчук С.Г., Кривенко К.В., Палагеча Д.Л. Дата подання 11.10.2024.

## Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей:

1. Iurii Bogomol, Elmira Ferkhatly, Serhii Ponomarchuk, Petro Loboda High-Temperature Ceramics Reinforced With High-Entropy Borides // Book of abstracts of 8th International Samsonov conference “Materials Science of Refractory Compounds” (MSRC-2022), May 24-27, 2022, Kyiv, Ukraine, P. 11.
2. Ievgen Solodkyi, Sergii Teslia, Iurii Bogomol, Petro Loboda Metal-ceramic composites based on reinforced ceramics / Program and the Book of Abstracts of Twenty-third annual conference YUCOMAT 2022 & Twelfth world round table conference on sintering XII WRTCS, Hunguest Hotel Sun Resort, Herceg Novi, Montenegro August 29 - September 2, 2022. P. 39.
3. Дуань Мантанг, Богомол Ю.І. Останні досягнення в дослідженнях щодо отримання високоентропійної боридної кераміки / Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2023», 27...28 квітня 2023 р., м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, С. 126-127.
4. I. Bogomol, E. Ferkhatly, Duan Mantang, D. Reznik, S. Ponomarchuk, P. Loboda Ceramic composites reinforced with high-entropy borides for high-temperature applications / Book of Abstracts HighMatTech UMRS 8th International Materials Science Conference HighMatTech-2023, October 2-6, 2023 Kyiv, Ukraine, P. 30.
5. Кривенко К. В., Палагеча Д. Л., Богомол Ю.І. Керамічні композити спрямовано армовані високоентропійними диборидами / Збірник тез IV Всеукраїнської конференції «Сучасне матеріалознавство. Матеріали та технології. СММТ-2023», 5-6 жовтня 2023 р., Інститут металознавства ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ, Україна, С. 25.
6. Богомол Ю.І. Високотемпературні матеріали / XII Конкурс інноваційних стартап проєктів Sikorsky Challenge 2023, 24-25 жовтня 2023 р., Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського.
7. Кривенко К.В., Палагеча Д.Л., Богомол Ю.І. Керамічні композити спрямовано армовані високоентропійними диборидами / Тези доповіді Дванадцятій конференції молодих вчених та спеціалістів «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування», 19–20 жовтня 2023 року, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля, Київ, С. 15-17.
8. Effect of cold isostatic pressing pressure of 300 MPa on transverse rupture strength of sintered WC-3 wt.%Co and WC-15 wt.%Co cemented carbides [Електронний ресурс] / Gennadiy Akimov [та ін.] // HighMatTech–2023 : 8th International Materials Science Conference HighMatTech-2023, Київ. – [Б. м.], 2023. – Режим доступу: <https://umrs.org.ua/activities/conferences/highmattech-2023/boa/>
9. Дуань Мантанг, Мосяк Василь Тарасович, Богомол Юрій Іванович Структура та властивості керамічних композиційних матеріалів SiC-(Ti0.2Zr0.2Hf0.2Nb0.2Ta0.2)B<sub>2</sub> / Збірник наукових доповідей міжнародної конференції: Materials and Technologies in Engineering (MTE-2024): International Conference on Engineering, Materials, Tegnologies, Transport, Луцьк, Україна, 14–16 травня 2024 р. С. 98-101. [https://mte.lntu.edu.ua/sites/default/files/2024-05/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%20%D0%9C%D0%A2%D0%86-2024\\_%D0%94%D0%A0%D0%A3%D0%9A\\_0.pdf](https://mte.lntu.edu.ua/sites/default/files/2024-05/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%20%D0%9C%D0%A2%D0%86-2024_%D0%94%D0%A0%D0%A3%D0%9A_0.pdf)
10. Effect of high hydrostatic pressure treatment of cemented carbides WC-3Co, WC-6Co, and WC-15Co on their Vickers hardness [Електронний ресурс] / Vitalii Sheremet [та ін.] // Book of abstracts of IXth International Samsonov conference “Materials Science of Refractory Compounds” (MSRC-2024). – [Б. м.], 2024. – Режим доступу: <https://doi.org/10.62564/m4-vs1330>
11. Iurii Bogomol, Elmira Ferkhatly, Mantang Duan, Dmytro Rieznik, Serhii Ponomarchuk, Yaroslav Zaulychnyi, Oleh Stepanov, Vasyl Mosiak, Kira Kryvenko, Dmytro Palagecha High-temperature ceramic composites directionally reinforced with hightentropy borides / Book of abstracts of IXth International Samsonov conference “Materials Science of Refractory Compounds” (MSRC-2024), May 27-30, 2024, Kyiv, Ukraine, P. 2. [https://drive.google.com/file/d/10YLLndkc\\_4GSFPZ2qwiqvKHzsNqkGbC7/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/10YLLndkc_4GSFPZ2qwiqvKHzsNqkGbC7/view?usp=sharing)

## Навчальні посібники:

1. Комп'ютерне моделювання методом скінченних елементів: Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів» спец. 132 «Матеріалознавство» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. В. Степанов, Ю. І. Богомол, А. В. Мініцький. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 112 с. <https://ela.kpi.ua/items/c359d006-c040-4106-b294-187378f247ef>
2. Інформатика, обчислювальна техніка та числові методи. Частина 2. Числові методи. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів» спеціальності 132 Матеріалознавство / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. В. Степанов, Т. О. Соловйова, М. Я. Втерковський. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,72 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 82 с. – Назва з екрана. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67776>