

УДК 621.763

РОЗРОБКА КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ZrO_2-CeO_2 БІОІНЖЕНЕРНОГО ВИКОРИСТАННЯ

Д-р техн. наук Е. С. Геворкян, канд. техн. наук В. П. Нерубацький, асп. О. М. Морозова, канд. хім. наук Д. С. Софронів, кандидати техн. наук В. О. Чижкала, Л. В. Волошина

DEVELOPMENT of CERAMIC MATERIALS ZrO_2-CeO_2 of BIOENGINEERING APPLICATIONS

Dr. Sc. (Tech.) E. S. Gevorkyan, PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, postgraduate O. M. Morozova, PhD (Chem.) D. S. Sofronov, PhD (Tech.) V. O. Chyshkala, PhD (Tech.) L. V. Voloshyna

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258543>



Анотація. Досліджено метод формування композиційних матеріалів на основі нанопорошків частково стабілізованого оксидом церію діоксиду цирконію, отриманих із розчинів фторидних солей. Підібрано найбільш оптимальний метод отримання нанопорошків з метою виготовлення з них щільних наноструктурних композитів біоінженерного використання. Отримання композитів на основі частково стабілізованого діоксидом церію діоксиду цирконію при гарячому пресуванні у вакуумі методом електроспікання дає змогу отримати високощільні композити з високою тріщиностійкістю, твердістю і модулем пружності вже при температурі 1400 °С, тиску 30 МПа та часу витримки 3 хвилини. Виявлено, що метод електроконсолідації у вакуумі забезпечує спікання зразків з високими значеннями модуля пружності і тріщиностійкості. Проведені дослідження дають змогу припустити, що з метою подальшого підвищення властивостей композитів на основі оксиду цирконію, частково стабілізованого діоксидом церію, необхідно поліпшити однорідність вихідних сумішей, а також додавати інші оксиди, зокрема оксид алюмінію, нітрид алюмінію, оксиди кремнію та магнію.

Ключові слова: біоінженерія, діоксид цирконію, електроконсолідація, кераміка, оксид церію.

Abstract. Method of composite materials formation based on particle-stabilized cerium dioxide zirconium nanopowders obtained from fluoride salt solutions has been investigated. The sintering of the powders was carried out by means of an electroconsolidation apparatus by hot pressing in a vacuum chamber. X-ray phase analysis was performed on a Shimadzu XRD-6000 diffractometer. Phase analysis of the samples was carried out using the data base of the American Society for Testing Materials. The surface morphology of the samples was investigated by scanning microscope JSM-6390LV. The most optimal method of nanopowders extraction was selected to produce solid nanostructured composites for bioengineering applications. Analysis of the microstructure of the samples showed that the composite systems are composed of particles ranging in size from 100 nm to 1500 nm. The samples show pores and cracks, which can be associated with the passage of grain boundary diffusion in the process of electro-consolidation of the samples. Derivation of composites based on zirconium dioxide stable at hot vacuum deposition by electrosintering makes it possible to

obtain the high performance composites with high resistance to abrasion, hardness and thrust modulus at a temperature of 1400 °C, a pressure of 30 MPa and a cycle time of 3 minutes. It was found that the method of electroconsolidation in vacuum provides the bonding of samples with high values of the Young's modulus and friction strength. Mechanical characteristics of ceramic systems based on zirconium dioxide, molded with cerium oxide, have rather high values. The dependence of change in the relative specific gravity of the studied samples shows that the increase in temperature of electroconsolidation, the overall level of composite density grows practically linearly, indicating a good particle compatibility of the powders. The conducted studies allow us to assume that with the purpose of further increasing of the properties of composites based on zirconium oxide, partially stabilized by cerium dioxide, it is necessary to improve the homogeneity of the resulting sums and add other oxides, in particular alumina oxide, alumina nitride, silicon oxide and magnesium oxide.

Keywords: bioengineering, zirconium dioxide, electroconsolidation, ceramics, cerium oxide.

Вступ. Керамічні композити мають високий потенціал як біоматеріали. Висока біосумісність керамік дає змогу використовувати їх як біоматеріали в області імплантології. Біоактивність та біостабільність керамічних матеріалів дають змогу їх застосовувати у разі заміни суглобів або у стоматологічних реконструкціях [1]. Однак, значним недоліком деяких керамічних композиційних матеріалів є явище гідротермального старіння або низькотемпературної деградації, яке може бути усунене шляхом легування оксидами металів [2, 3]. Механічні властивості діоксиду цирконію визначаються трансформаційними перетвореннями під впливом різних факторів. Так, фазове перетворення з тетрагональної на моноклінну фазу може бути викликане температурою, напругою і обробкою, у той час як легування оксидами MgO, Y₂O₃, CeO і CaO призводить до стабілізації тетрагональної та кубічної фаз [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи на основі оксиду церію знайшли застосування в області ортопедії, зокрема як лікування остеосаркоми [6]. Завдяки антиокислювальним властивостям CeO₂, збільшення речовини як покриття здатне підвищити життєздатність клітин, трохи знижуючи при цьому хімічну активність [7].

У роботі [8] йдеться про розробку системи ZrO₂-CeO₂, яка застосовується як

антибактеріальний агент. Тестування властивостей отриманої системи проти бактеріальних штамів Staphylococcus aureus, Shigella flexneri та Bacillus sp. показало високу активність протибактеріальних патогенів. Дослідження цитотоксичної активності показують, що легування частинок ZrO₂ частинками CeO₂ посилює цитологічну активність.

Проведені дослідження [9] показують, що нанорозмірний оксид церію має властивості антиоксиданту і може бути застосований у біомедичній сфері як захист при окисних і протизапальних процесах і променевому ураженні. Наголошується, що нанорозмірний оксид церію здатний викликати клітинну стійкість від зовнішнього джерела окисного стресу та захищати клітини від атак окислювача, а також може сприяти позитивному впливу впродовж деякого періоду часу без необхідності повторного дозування.

Цирконій-керамічні композити активно застосовуються у протезуванні, зокрема системи, стабілізовані добавкою CeO₂, широко поширені як цільнокерамічні стоматологічні реставрації [10]. Цирконієві кераміки мають такі механічні властивості, як висока тріщиностійкість і міцність на вигин, розмірна та хімічна стабільність, а також порівняну з металами рентгеноконтрастність, завдяки чому вони є привабливими матеріалами у реставраційній стоматології. Поряд з перевагами такі системи мають явище

низькотемпературної деградації, яке може бути вирішене стабілізацією метастабільних фаз за рахунок введення оксидних добавок. Так, наприклад CeO_2 і Y_2O_3 спроможні підтримувати високі температури метастабільних фаз в умовах навколишнього середовища, оскільки мають відносно високий рівень розчинності в матриці ZrO_2 . Стабілізація тетрагональної фази найбільш успішно реалізується шляхом легування оксидами ітрію та церію. Незважаючи на наявність таких чудових механічних властивостей Y-TZP керамік, як міцність порядку 700 МПа та в'язкість руйнування порядку $4,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, проблема розкладання ітрію стабілізованих систем при тривалому контакті з біологічними рідинами вимагає розробки керамічних матеріалів, легованих альтернативними стабілізаційними добавками. Розроблення технології спікання кераміки на основі діоксиду цирконію визначає механічні характеристики отриманих біосумісних систем.

У роботі [11] досліджено спікання порошоків 3Y-TZP, легованих Al_2O_3 та CeO_2 , в атмосферних умовах зі швидкістю $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{хв}$ при температурі від 1250 до $1550 \text{ }^\circ\text{C}$ та часі витримки 2 год до охолодження до кімнатної температури. Повідомляється, що легування цирконієвої кераміки 0,3 мас.% Al_2O_3 і 0,5 мас.% CeO_2 забезпечує мінімальний ефект старіння та низький коефіцієнт тертя 3Y-TZP керамік.

Поряд зі спіканням кераміки на основі діоксиду цирконію шляхом одновісного пресування в циліндричні зразки [12], методом одновісного сухого ущільнення нанопорошків під дією ультразвуку при різній потужності та тиску [13], а також двоступінчастому спіканні ітрію стабілізованих порошоків діоксиду цирконію [14], метод гарячого пресування керамічних систем на основі діоксиду цирконію демонструє значні результати [15].

У роботі [16] досліджено одержання однофазних порошоків $\beta\text{-ZrO}_2$ з так званими м'якими агломератами, що відтворюють

морфологію з ацетилацетоном як хелатоутворювачем, з метою визначення впливу ацетилацетону на фазовий склад і морфологію порошоків ZrO_2 , легованих церієм, для біомедичних застосувань. Порошки $0,9\text{ZrO}_2,1\text{CeO}_2$ було отримано гідролізом та конденсацією з подальшим прожарюванням n-пропоксиду цирконію в простому золі. Зразки було охарактеризовано за допомогою дифракції рентгенівських променів (XRD), раманівської спектроскопії (RS), теплового аналізу (TGA/DTA) та вимірювань за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM).

У роботі [17] нанокаталізатори $\text{CuO}_x\text{-ZrO}_2\text{-CeO}_2$ (CZC) з різними співвідношеннями Cu/Zr було ефективно виготовлено за допомогою простої синтетичної стратегії без розчинників. Досліджено вплив легування Zr на структуру та реакційну здатність каталізаторів $\text{CuO}_x\text{-CeO}_2$ за допомогою окислення окису вуглецю (CO) та відновлення 4-нітрофенолу (4-NP) як модельних реакцій. Виявлено, що введення Zr зменшило агломерацію поверхневих форм Cu, утворило більше кисневих вакансій у внутрішній частині та Cu^+ на поверхні каталізатора та підвищило відновлюваність $\text{CuO}_x\text{-CeO}_2$. Каталізатори CZC демонструють помітно підвищену каталітичну активність завдяки великій кількості поверхнево-активних центрів і покращеним окислювально-відновним властивостям, які забезпечуються відповідним легуванням Zr в $\text{CuO}_x\text{-CeO}_2$. Ця робота не тільки пропонує практичний спосіб реконструкції розподілу активних металів на підкладці з оксиду металу, але також забезпечує високоефективну стратегію для приготування оксидних каталізаторів з відмінними каталітичними характеристиками.

Таким чином, можна зробити висновок, що питання розроблення технології керамічних систем та дослідження оптимального процесу

спікання складу ZrO_2-CeO_2 з метою широкого застосування оксидних керамік у біоінженерії дотепер є невирішеним і актуальним.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є виявлення закономірностей консолідації високощільного керамічного матеріалу складу ZrO_2-CeO_2 , що дасть можливість отримання композиційних матеріалів біоінженерного застосування з високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– дослідити метод гарячого пресування з метою консолідації високощільного керамічного матеріалу складу ZrO_2-CeO_2 , отриманого шляхом хімічного розкладання фторидних солей;

– встановити оптимальний спосіб формування наноструктурних композитів з високими фізико-механічними властивостями.

Основна частина дослідження.

Матеріали та методи. У роботі використовували фтороводородну кислоту HF, концентровану азотну кислоту HNO_3 , водний розчин аміаку NH_4OH , металевий цирконій, полівініловий спирт. Кваліфікація всіх реагентів – х.ч. Для приготування розчинів використовували дистильовану воду.

Одержання частинок діоксиду цирконію здійснювали таким чином: металевий цирконій масою 4 г поміщали у тефлонову склянку об'ємом 100 мл, доливали 10 мл фтороводородної кислоти та 10 мл дистильованої води. Після розчинення цирконію до отриманого розчину доливали при безперервному перемішуванні 60 мл дистильованої води та розраховану кількість полівінілового спирту. Отриману суміш перемішували протягом 1 год, а потім додавали 20 мл водного розчину аміаку і перемішували протягом 30 хв. Процес осадження проводили при 20, 50 та 80 °C. Вміст полівінілового спирту варіювали в

межах масового співвідношення $m(Zr):m(PVC)$ 1:0.1, 1:0.5 та 1:1. Після завершення отриманий осад відфільтровували, промивали дистильованою водою та висушували при кімнатній температурі протягом 48 годин. Висушений осад потім нагрівали в муфельній печі до температури 800 °C (швидкість нагріву складала 100 °C/год), витримували протягом 4 годин, а потім діоксид цирконію охолоджували до кімнатної температури.

Спікання порошків проводилося за допомогою установки електроспікання шляхом гарячого пресування у вакуумній камері. Початкова маса виготовлених зразків становила 3 г. Графітові прес-форми забезпечували міцність при тиску 45 МПа. Температура консолідації вимірювалася за вказаного тиску, час витримки становив 3 хв. Підтримка процесу спікання забезпечувалася змінним електричним струмом величиною 3000...5000 А та напругою 5...10 В.

Рентгенофазовий аналіз проводився на дифрактометрі Shimadzu XRD-6000 з такими режимами: $CuK\alpha$ -випромінювання з $\lambda = 1,54187 \text{ \AA}$; вигнутий графітовий монохроматор перед лічильником; метод $\theta-2\theta$ безперервного сканування; швидкість сканування 1,2 °/хв; кутовий діапазон $2\theta = 5,0...100,0^\circ$ з кроком $0,02^\circ$; напруга на рентгенівській трубці – 40 кВ, струм – 30 мА; без обертання зразка. Фазовий аналіз зразків проводили за допомогою бази даних ASTM (American Society for Testing Materials).

Дослідження морфології поверхні отриманих складів проводили з використанням скануючого мікроскопа (SEM) JSM-6390LV.

Результати та обговорення. Вихідні нанопорошкові суміші попередньо відпалювалися при температурі 800 °C. Було проведено експерименти при спіканні вихідних сумішей нанопорошків $ZrO_2-5 \text{ мас.}\% CeO_2$ за різних температур спікання (рис. 1).

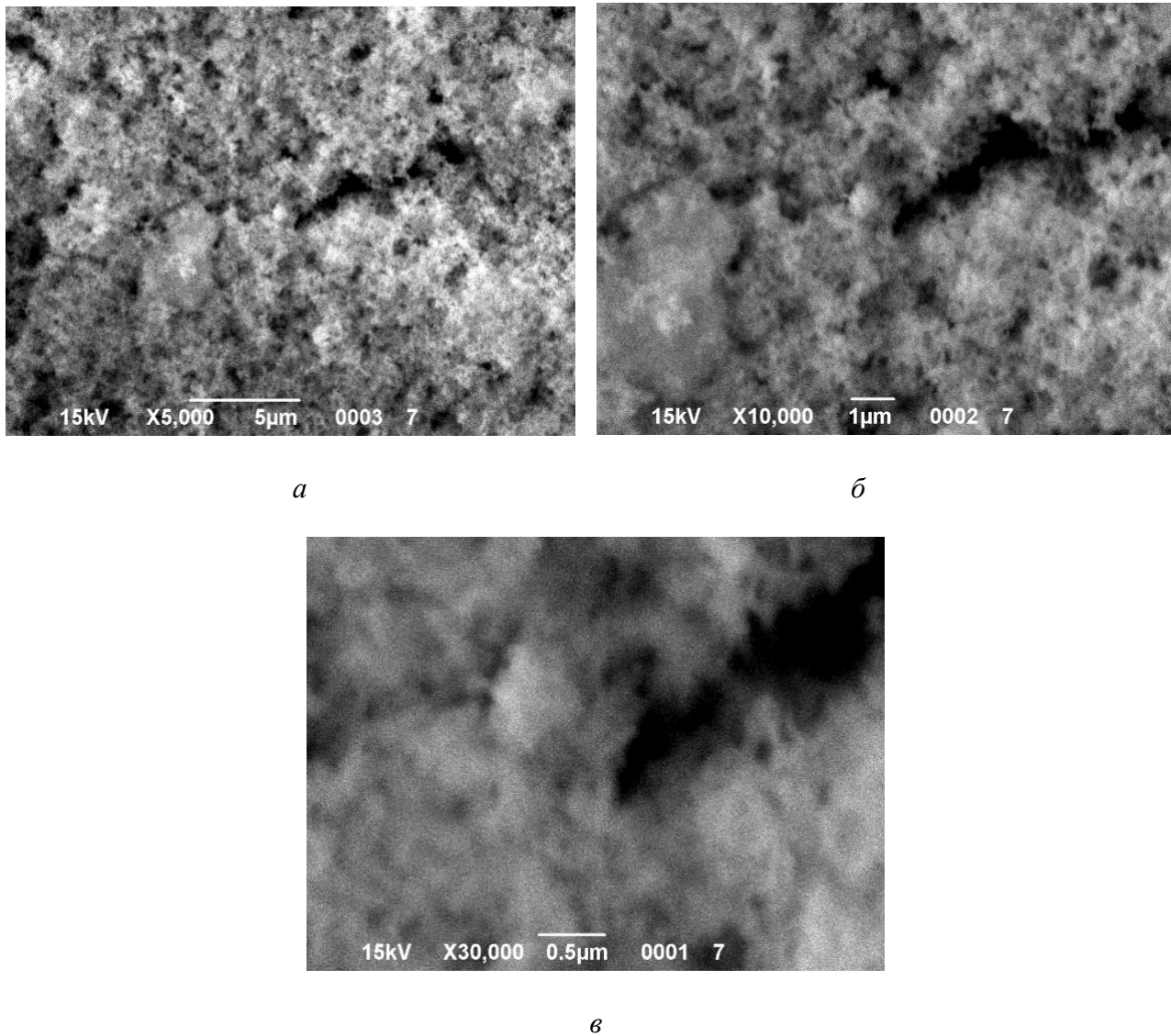
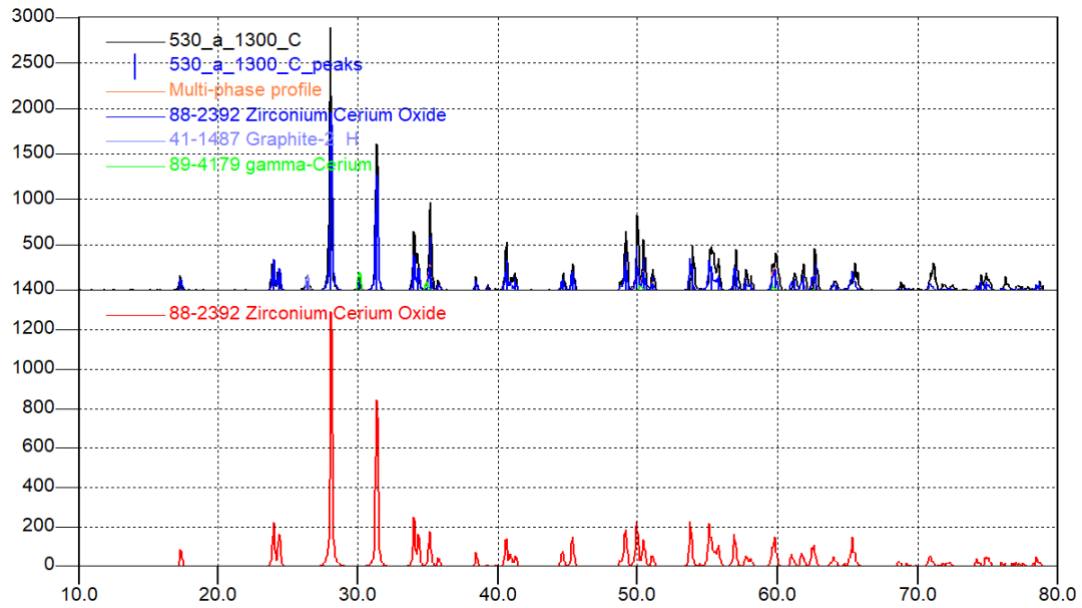


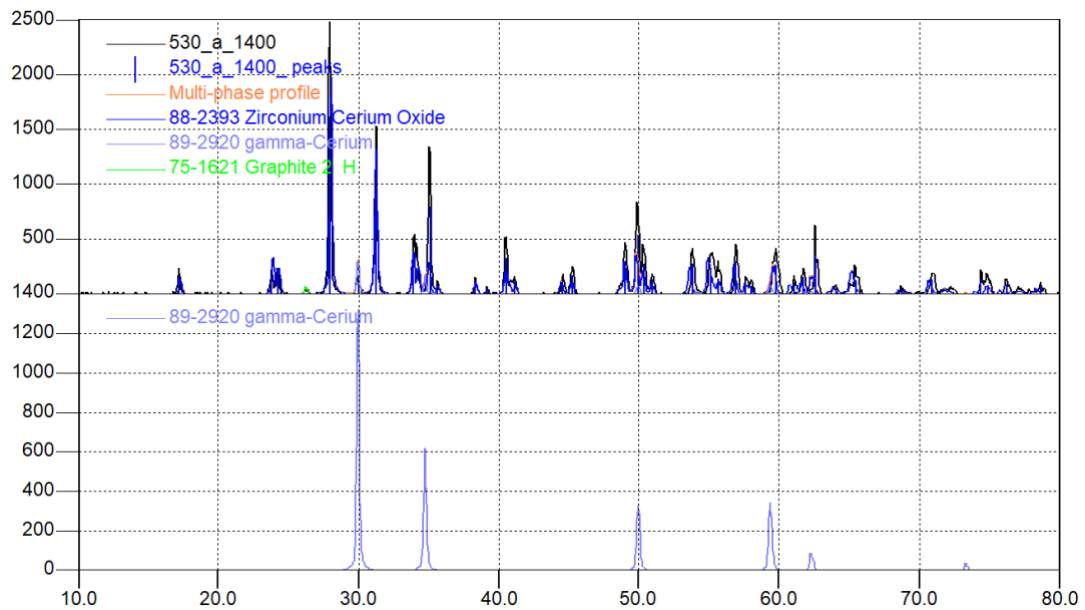
Рис. 1. Мікрофотографії частинок $ZrO_2-5 \text{ мас.}\% \text{ CeO}_2$, відпалених при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ і спечених за температури: а – $1300 \text{ }^\circ\text{C}$; б – $1400 \text{ }^\circ\text{C}$; в – $1500 \text{ }^\circ\text{C}$

Дифрактограми зразків $ZrO_2-5 \text{ мас.}\% \text{ CeO}_2$, спечених за різних температур (рис. 2), показують наявність піків, що відповідають $\gamma\text{-Ce}$ та $(ZrCe)O_2$. У випадку $\Delta Zr = 0,92 \dots 0,95$, $\Delta Ce = 0,05 \dots 0,08$

також спостерігаються структурні вимірювання твердих розчинів $ZrO_2\text{-CeO}_2$ навколо моноклинно-тетрагональної фазової межі.

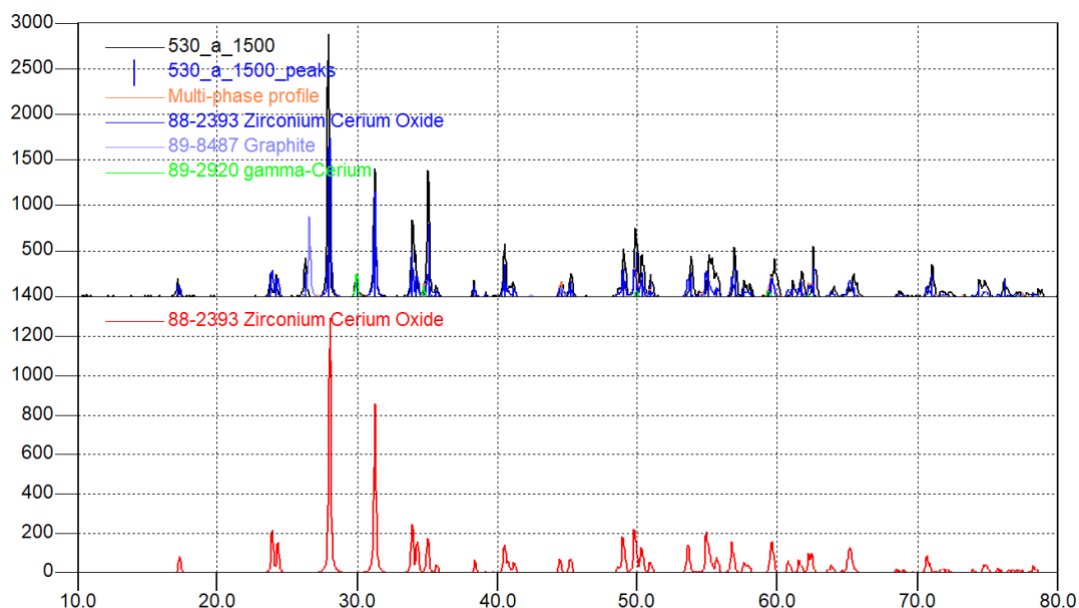


a



б

Рис. 2. Дифрактограми керамічних систем $ZrO_2-5 \text{ мас.}\% \text{ CeO}_2$, спечених гарячим вакуумним пресуванням за температури:
a – 1300 °C; *б* – 1400 °C; *в* – 1500 °C

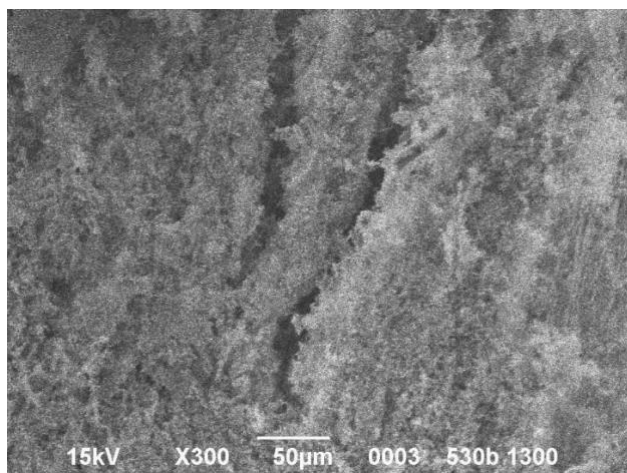


б

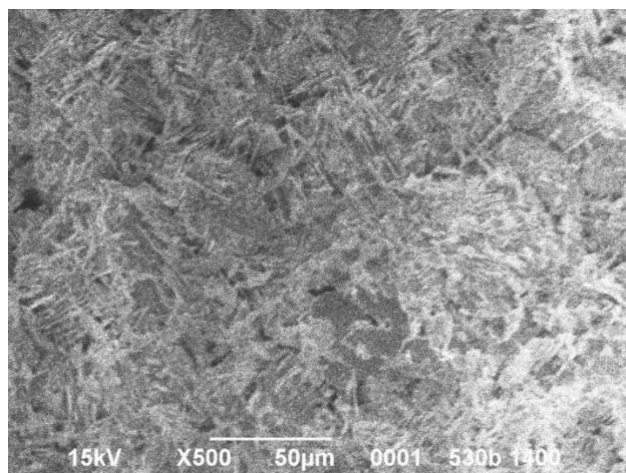
Рис. 2, аркуш 2

Аналіз мікроструктури зразків (рис. 3) показує, що композиційні сполуки складаються з частинок, розміри яких від 100 нм до 1500 нм. У зразках

спостерігаються пори і тріщини, що може бути пов'язано із протіканням зернограничної дифузії у процесі електроконсолідації зразків.

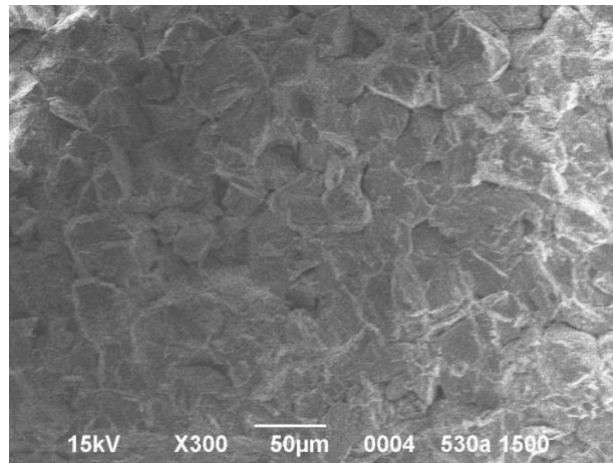


а



б

Рис. 3. Мікроструктури керамічних систем $ZrO_2-5 \text{ мас.}\% \text{ CeO}_2$, гарячепресованих при часі витримки 3 хв за температури:
а – 1300 °C; б – 1400 °C; в – 1500 °C



6

Рис. 3, аркуш 2

Механічні характеристики керамічних систем на основі діоксиду цирконію, легованого оксидом церію, мають досить високі значення, які можна порівняти з даними, висвітленими в літературних джерелах (табл. 1). Залежність

зміни відносної густини досліджуваних зразків (рис. 4) показує, що зі зростанням температури електроконсолідації загальний рівень густини композиту зростає практично лінійно, що свідчить про хорошу ущільнюваність порошків.

Таблиця 1

Механічні властивості керамічних матеріалів на основі діоксиду цирконію

Склад	Модуль пружності, ГПа	Тріщиностійкість, МПа·м ^{1/2}	Джерело
3Y-TZP	195,3 ± 4,2	7,2 ± 0,5	[18]
(Ce,Y)-TZP/Al ₂ O ₃	228,3 ± 6,5	11,3 ± 0,4	[18]
ZrO ₂ -20 % Al ₂ O ₃	280 ± 25	-	[19]
ZrO ₂ -5 мас.% CeO ₂	278 ± 7	11,1 ± 0,4	Дана робота

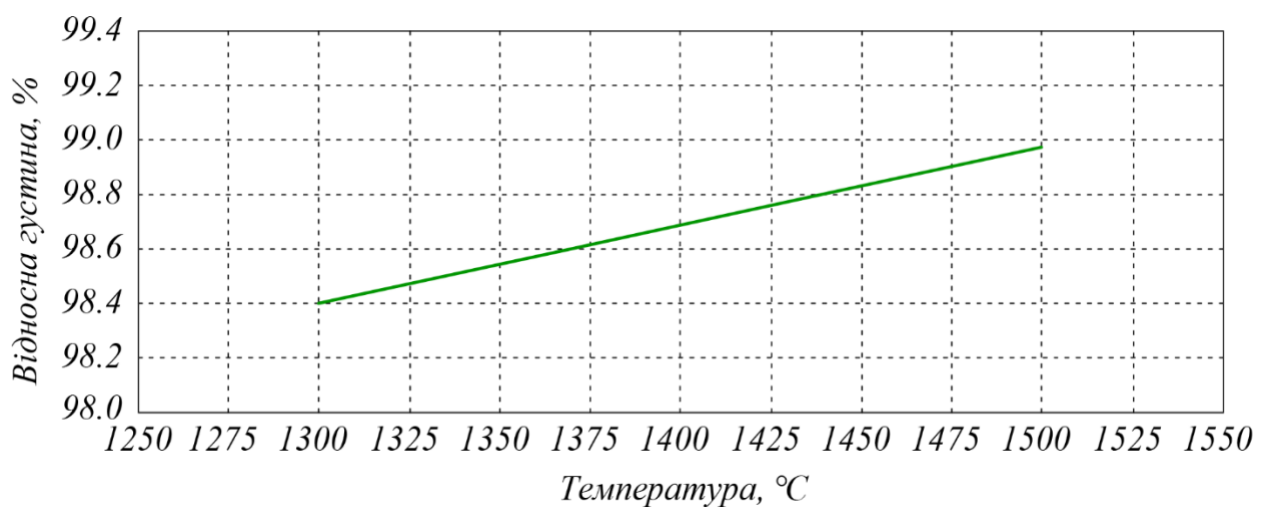


Рис. 4. Залежність відносної густини досліджуваних систем складу ZrO₂-5 мас.% CeO₂ від температури спікання

Таким чином, отримання композитів на основі частково стабілізованого діоксидом церію діоксиду цирконію при гарячому пресуванні у вакуумі методом електроспікання дає змогу отримати високощільні композити з високою тріщиностійкістю, твердістю і модулем пружності вже при температурі 1400 °С, тиску 30 МПа та часу витримки 3 хв. Проведені дослідження дають змогу припустити, що з метою подальшого підвищення властивостей композитів на основі оксиду цирконію, частково стабілізованого діоксидом церію, необхідно поліпшити однорідність вихідних сумішей, а також додавати інші оксиди, зокрема оксид алюмінію, нітрид алюмінію, оксиди кремнію та магнію.

Висновки:

– досліджено метод отримання композиційних керамічних високощільних матеріалів на основі нанопорошків частково стабілізованого оксидом церію діоксиду цирконію, отриманих з розчинів фторидних солей шляхом хімічного розкладання;

– встановлено, що метод електроконсолідації є оптимальним способом формування наноструктурних композитів з високими значеннями модуля пружності і тріщиностійкості, а застосування таких нанодобавок як оксид церію, оксид алюмінію та карбід кремнію є перспективним напрямом розробки високоміцних керамічних матеріалів біоінженерного застосування.

Список використаних джерел

1. Gevorkyan E., Nerubatskyi V., Chyshkala V., Morozova O. Revealing specific features of structure formation in composites based on nanopowders of synthesized zirconium dioxide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 5, No. 12 (113). P. 6–19. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.242503.
2. Chyshkala V. O., Lytovchenko S. V., Gevorkyan E. S., Nerubatskyi V. P., Morozova O. M. Structural phase processes in multicomponent metal ceramic oxide materials based on the system Y–Ti–Zr–O (Y_2O_3 – TiO_2 – ZrO_2). *SWorldJournal*. 2021. Issue 7. Part 1. P. 17–32. DOI: 10.30888/2663-5712.2021-07-01-008.
3. Gevorkyan E. S., Nerubatskyi V. P., Chyshkala V. O., Morozova O. M. Cutting composite material based on nanopowders of aluminum oxide and tungsten monocarbide. *Modern engineering and innovative technologies*. 2021. Issue 15. Part 2. P. 6–14. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-15-02-020.
4. Saridag S., Tak O., Alniacik G. Basic properties and types of zirconia: An overview. *World Journal of Stomatology*. 2013. Vol. 2, Iss. 3. P. 40–47. DOI: 10.5321/wjs.v2.i3.40.
5. Геворкян Э. С., Нерубацкий В. П., Мельник О. М. Горячее прессование нанопорошков состава ZrO_2 -5% Y_2O_3 . *Зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2010. Вип. 119. С. 106–110.
6. Li H., Xia P., Pan S., Qi Z., Fu C., Yu Z. et al. The Advances of Ceria Nanoparticles for Biomedical Applications in Orthopaedics. *International Journal of Nanomedicine*. 2020. Vol. 15. P. 7199–7214. DOI: 10.2147/ijn.s270229.
7. Li K., Shen Q., Xie Y., You M., Huang L., Zheng X. Incorporation of Cerium Oxide into Hydroxyapatite Coating Protects Bone Marrow Stromal Cells Against H_2O_2 -Induced Inhibition of Osteogenic Differentiation. *Biological Trace Element Research*. 2017. Vol. 182, Iss. 1. P. 91–104. DOI: 10.1007/s12011-017-1066-3.
8. Saleem A. M., Rajasekar S., Kaviyarasu K., Perumalsamy R., Ayeshamariam A., Jayachandran M. Green Combustion Synthesis of CeO_2 and TiO_2 Nanoparticles Doped with Same Oxide Materials of ZrO_2 : Investigation of in vitro Assay with Antibiotic Resistant Bacterium (ARB)

and Anticancer Effect. *European Journal of Medicinal Plants*. 2019. Vol. 30, Iss. 2. P. 1–17. DOI: 10.9734/ejmp/2019/v30i230171.

9. Mohd Fadzil N. A., AB Rahim M. H., Pragas Maniam G. (2018). Brief review of ceria and modified ceria: synthesis and application. *Materials Research Express*. 2018. Vol. 5, Iss. 8. 085019. DOI: 10.1088/2053-1591/aad2b5.

10. Nakonieczny D. S., Ziębowicz A., Paszenda, Z. K., & Krawczyk, C. Trends and perspectives in modification of zirconium oxide for a dental prosthetic application: A review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2017. Vol. 37, Iss. 1. P. 229–245. DOI: 10.1016/j.bbe.2016.10.005.

11. Golieskardi M., Satgunam M., Ragurajan D., Hoque M. E., Ng A. M. H. (2020). Microstructural, Tribological, and Degradation Properties of Al₂O₃- and CeO₂-Doped 3 mol.% Ytria-Stabilized Zirconia Bioceramic for Biomedical Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29, Iss. 5. P. 2890–2897. DOI: 10.1007/s11665-020-04829-3.

12. Lakusta M., Danilenko I., Konstantinova T., Volkova G. Influence of Obtaining Conditions on Kinetics of the Initial Sintering Stage of Zirconia Nanopowders. *Nanoscale Research Letters*. 2016. Vol. 11, Iss. 2. 238. DOI: 10.1186/s11671-016-1452-3.

13. Karban O. V., Khasanov O. Investigation of zirconia nanoceramics microstructure. *Physics of Low-Dimensional Structures*. 2003. Vol. 3. P. 297–308.

14. Lourenço M. A., Cunto G. G., Figueiredo F. M., Frade J. R. Model of two-step sintering conditions for yttria-substituted zirconia powders. *Materials Chemistry and Physics*. 2011. Vol. 126. P. 262–271. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2010.11.028.

15. Gevorkyan E. S., Morozova O. M., Sofronov D. S., Nerubatskyi V. P., Ponomarenko N. S. The formation of ZrO₂-Y₂O₃-nanoparticles from fluoride solutions. Abstracts of the II International Advanced Study Conference on Condensed Matter and Low Temperature Physics 2021 «CM<P 2021» (6–12 June 2021, Kharkiv). Kharkiv: FOP Brovin O. V., 2021. P. 190.

16. Nakonieczny D., Paszenda Z., Drewniak S., Radko T., Lis M. ZrO₂-CeO₂ ceramic powders obtained from a sol-gel process using acetylacetone as a chelating agent for potential application in prosthetic dentistry. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. 2016. Vol. 18, No. 3. P. 53–60. DOI: 10.5277/ABB-00476-2015-03.

17. Liu B., Li Y., Qing S., Wang K., Xie J., Cao Y. Engineering CuO_x-ZrO₂-CeO₂ nanocatalysts with abundant surface Cu species and oxygen vacancies toward high catalytic performance in CO oxidation and 4-nitrophenol reduction. *CrystEngComm*. 2020. Iss. 22. P. 4005–4013. DOI: 10.1039/d0ce00588f.

18. Santos C. dos, Coutinho I. F., Amarante J. E. V., Alves M. F. R. P., Coutinho M. M., Moreira da Silva C. R. Mechanical properties of ceramic composites based on ZrO₂ co-stabilized by Y₂O₃-CeO₂ reinforced with Al₂O₃ platelets for dental implants. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2021. Vol. 116. 104372. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104372.

19. Promakhov V., Zhukov A., Dubkova Y., Zhukov I., Kovalchuk S., Zhukova T. et. al. Structure and Properties of ZrO₂-20 % Al₂O₃ Ceramic Composites Obtained Using Additive Technologies. *Materials*. 2018. Vol. 11. 2361. DOI: 10.3390/ma11122361.

Геворкян Едвин Спартаківич, доктор технічних наук, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Морозова Оксана Миколаївна, аспірантка кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (097) 170-62-95.

E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Софронів Дмитро Семенович, кандидат хімічних наук, науковий співробітник Науково-технологічного комплексу «Інститут монокристалів» Національної академії наук України. Тел.: +38 (068) 250-17-57.

E-mail: 19sofronov73@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-4835-7001.

Чишкала Володимир Олексійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Тел.: +38 (097) 242-05-56.

E-mail: vchishkala@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-8634-4212.

Волошина Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, асистент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 192-78-11.

E-mail: ludmivol@gmail.com. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2039-111X>.

Gevorkyan Edwin Spartakovych, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01.

E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Morozova Oksana Mykolaivna, Postgraduate, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (097) 170-62-95. E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Sofronov Dmytro Semenovich, PhD (Chem.), Researcher, State Scientific Institution Scientific and Technological Complex "Institute of Single Crystals" NASciences of Ukraine. Tel.: +38 (068) 250-17-57.

E-mail: 19sofronov73@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-4835-7001.

Chyshkala Volodymyr Oleksiyovich, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Reactor Construction Materials and Physical Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University. Tel.: +38 (097) 242-05-56.

E-mail: vchishkala@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-8634-4212.

Voloshyna Liudmyla Volodymyrivna, PhD (Tech.), Assistant, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (050) 192-78-11. E-mail: ludmivol@gmail.com. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2039-111X>.

Статтю прийнято 02.02.2022 р.