

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (J7)

УДК 621.762

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ СИНТЕЗОВАНОГО ДІОКСИДУ ЦИРКОНІЮ ПІД ЧАС ГАРЯЧОГО ПРЕСУВАННЯ

Д-р техн. наук Е. С. Геворкян, канд. техн. наук В. П. Нерубацький

FEATURES OF NANOCOMPOSITE FORMATION BASED ON SYNTHESIZED ZIRCONIA DURING HOT PRESSING

Doctor of Engineering Science E. S. Hevorkian,
Candidate of Engineering Science V. P. Nerubatskyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371330>



Анотація. Комбінованим методом сумісного осадження та гідротермального розкладання синтезовано нанокристалічні порошки складу $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$. Як вихідні компоненти використовували нітрат цирконію, ацетат ітрію та аміак як осаджувач, а для стабілізації дисперсної системи – оксиетильований нонилфенол. Встановлено, що застосування комбінованого методу синтезу забезпечує формування однорідних за складом слабоагломерованих нанокристалічних частинок діоксиду цирконію, стабілізованого ітрієм. Дослідження фазового складу синтезованих порошків методом рентгенофазового аналізу показало утворення однофазного твердого розчину $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ із тетрагональною кристалічною ґраткою. За результатами рентгеноспектрального аналізу встановлено відповідність елементного складу синтезованого матеріалу заданому стехіометричному співвідношенню компонентів. Методом просвічувальної електронної мікроскопії встановлено, що порошок складається зі сферичних частинок розміром 3–15 нм, при цьому розмір слабкозв'язаних агрегатів не перевищує 500 нм. Дослідження щільності порошків методом гелієвої пікнометрії показало, що отримані порошки мають щільність понад 90 % теоретичної, що свідчить про наявність розвиненої пористої структури та адсорбованої вологи на поверхні наночастинок. Спінання синтезованих нанопорошків відбувалося за методом гарячого пресування з прямим пропусканням струму через графітову прес-форму. На підставі результатів дилатометричних досліджень визначено оптимальні параметри гарячого пресування: температура 1200 °С і витримка 5 хв. Методами атомно-силової та растрової електронної мікроскопії встановлено формування щільної наноструктурованої кераміки із середнім розміром структурних складових 50–200 нм. Отримані керамічні зразки мають високі фізико-механічні властивості: мікротвердість становить 1408 HV, межа міцності на стиск – 2586 МПа, а відносна щільність досягає 98 % теоретичної. Показано, що використання нанокристалічних порошків, синтезованих методом сумісного осадження з подальшим гідротермальним розкладанням, сприяє формуванню однорідної тонкодисперсної структури керамічного матеріалу за знижених температур гарячого пресування.

Ключові слова: гідротермальний синтез, стабілізований діоксид цирконію, нанопорошки, гаряче пресування, наноструктурована кераміка, мікроструктура, тетрагональна фаза, механічні властивості.

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Геворкян Е. С., Нерубацький В. П., 2026.

Abstract. Nanocrystalline powders of the composition $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ were synthesized by a combined method of co-precipitation and hydrothermal decomposition. Zirconium nitrate, yttrium acetate, and ammonia as a precipitating agent were used as initial components, while oxyethylated nonylphenol was used to stabilize the dispersed system. It was established that the application of the combined synthesis method ensures the formation of compositionally homogeneous weakly agglomerated nanocrystalline particles of stabilized zirconium dioxide. Investigation of the phase composition of the synthesized powders by X-ray diffraction analysis showed the formation of a single-phase solid solution of $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ with a tetragonal crystal lattice. According to the results of X-ray spectral analysis, the elemental composition of the synthesized material corresponds to the specified stoichiometric ratio of the components. Transmission electron microscopy established that the powder consists of spherical particles with sizes of 3–15 nm, while the size of weakly bonded agglomerates does not exceed 500 nm. Investigation of powder density by helium pycnometry showed that the obtained powders have a density exceeding 90 % of the theoretical value, indicating the presence of a developed porous structure and adsorbed moisture on the surface of nanoparticles. Sintering of the synthesized nanopowders was carried out by hot pressing with direct current passage through a graphite die. Based on the results of dilatometric studies, the optimal hot-pressing parameters were determined: temperature of 1200 °C and holding time of 5 min. Atomic force microscopy and scanning electron microscopy methods established the formation of dense nanostructured ceramics with an average size of structural constituents of 50–200 nm. The obtained ceramic specimens are characterized by high physical and mechanical properties: the microhardness is 1408 HV, the compressive strength is 2586 MPa, and the relative density reaches 98 % of the theoretical value. It was shown that the use of nanocrystalline powders synthesized by co-precipitation followed by hydrothermal decomposition promotes the formation of a homogeneous fine-dispersed structure of the ceramic material at reduced hot-pressing temperatures.

Keywords: hydrothermal synthesis, stabilized zirconium dioxide, nanopowders, hot pressing, nanostructured ceramics, microstructure, tetragonal phase, mechanical properties.

Актуальність теми дослідження.

Сучасний розвиток машинобудування, енергетики, електроніки, біомедичних технологій і високотемпературної техніки потребує створення нових керамічних матеріалів із підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками. Одним із найбільш перспективних матеріалів для таких застосувань є стабілізований діоксид цирконію, який має високу міцність, тріщиностійкість, хімічну інертність, термостійкість і біосумісність. Особливий інтерес викликають наноструктуровані керамічні матеріали на основі ZrO_2 , оскільки зменшення розміру структурних елементів до нанометрового рівня дає змогу суттєво підвищити комплекс механічних властивостей і стабільність експлуатаційних характеристик. Водночас отримання високощільної наноструктурованої

цирконієвої кераміки пов'язане з низкою технологічних труднощів, зокрема забезпеченням високої дисперсності порошків, запобіганням утворенню міцних агломератів та інтенсивному росту зерен під час спікання. Тому актуальним напрямом досліджень є розроблення ефективних методів синтезу слабкоагломерованих нанокристалічних порошків і вдосконалення режимів їх консолідації. Використання комбінованого методу сумісного осадження та гідротермального розкладання в поєднанні з гарячим пресуванням із прямим пропусканням струму створює передумови для формування щільної однорідної наноструктури за знижених температур спікання. У зв'язку з цим дослідження особливостей формування наноккомпозитів на основі синтезованого діоксиду цирконію є актуальним науковим і практичним завданням.

Вступ. Унікальне поєднання властивостей стабілізованого діоксиду цирконію, зокрема високої механічної міцності, в'язкості руйнування, вогнетривкості, хімічної стійкості, низької теплопровідності та біоінертності, робить його одним із найбільш затребуваних функціональних матеріалів сучасності [1–6]. Керамічні матеріали на основі ZrO_2 широко використовують у металургії, машинобудуванні, енергетиці, авіакосмічній техніці, електроніці, медицині та стоматології [7, 8]. Особливе значення стабілізований діоксид цирконію має для виготовлення теплозахисних покриттів [9, 10], ріжучого інструменту [11, 12], твердотілих паливних елементів [13, 14], кисневих сенсорів [15, 16], біомедичних імплантів [17–20] і високонавантажених конструкційних елементів [21, 22].

Встановлено, що зі зменшенням розмірів частинок до нанометрового діапазону властивості твердих тіл стають розмірозалежними. Зменшення розмірів зерен сприяє підвищенню міцності, твердості, зносостійкості, стабільності структури матеріалу [23, 24]. Отримання наноструктурованої цирконієвої кераміки з однорідною тонкодисперсною структурою є одним із найбільш перспективних шляхів підвищення комплексу її фізико-механічних характеристик. Водночас ефективність формування таких матеріалів значною мірою визначена характеристиками вихідних порошків, насамперед їхнім фазовим складом, дисперсністю, морфологією частинок і ступенем агломерації [25, 26].

Для виробництва високощільної функціональної кераміки нового покоління, а також сенсорів, акумуляторних систем, каталізаторів, сорбентів і біосумісних матеріалів необхідне отримання нанокристалічних порошків із контрольованими структурними параметрами. Одним із основних завдань при цьому є забезпечення високої гомогенності вихідних сумішей і формування

наночастинок, здатних до ефективного ущільнення під час спікання.

Серед сучасних методів консолідації нанопорошків особливий інтерес становить гаряче пресування з прямим пропусканням струму, яке дає змогу інтенсифікувати процес спікання, знизити температуру ущільнення та мінімізувати ріст зерен [27–29]. Поєднання цього методу з використанням нанокристалічних порошків, отриманих комбінованими методами синтезу, створює передумови для формування щільної наноструктурованої кераміки з високими експлуатаційними характеристиками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для отримання нанокристалічного діоксиду цирконію на сьогодні використовують широкий спектр фізико-хімічних методів синтезу, серед яких осадження з розчинів, золь-гель технологія, гідротермальний синтез, плазмохімічний синтез, співосадження, механохімічна обробка та методи термічного розкладання солей [30–37]. Застосування різних технологічних підходів забезпечує отримання порошків ZrO_2 із різною морфологією, фазовим складом, ступенем агломерації та розподілом частинок за розмірами. При цьому параметри синтезу, зокрема температура, тиск, тривалість процесу та хімічний склад середовища, істотно впливають на характеристики кінцевого продукту [38–41].

Одним із найбільш перспективних методів отримання нанокристалічного діоксиду цирконію є гідротермальний синтез, який забезпечує формування вискодисперсних порошків із вузьким розподілом частинок за розмірами та відносно низьким ступенем агломерації [42, 43]. Перевагою цього методу є можливість синтезу нанокристалів із контрольованою морфологією і стабілізованим фазовим складом без необхідності високотемпературного випалу. Водночас реалізація гідротермального синтезу потребує використання високих температур,

значного тиску та спеціального технологічного обладнання [44, 45].

У науковій літературі відсутній єдиний підхід щодо механізмів формування нанокристалів діоксиду цирконію в гідротермальних умовах, а також щодо оптимальних параметрів синтезу. Крім того, значну увагу приділяють проблемі агломерації наночастинок, яка негативно впливає на процес ущільнення порошків і формування однорідної структури кераміки [46, 47]. Саме тому перспективним напрямом є застосування комбінованих методів синтезу, що поєднують переваги співосадження та гідротермальної обробки.

Метод сумісного осадження забезпечує високий рівень гомогенності вихідних компонентів на молекулярному рівні, а подальше гідротермальне розкладання сприяє формуванню слабоагломерованих нанокристалічних частинок ZrO_2 [48–51]. Використання таких порошків у поєднанні з сучасними методами консолідації, зокрема гарячим пресуванням із прямим пропусканням струму, відкриває можливість отримання щільної наноструктурованої кераміки з покращеними механічними властивостями та зниженими температурами спікання [52, 53]. Проте питання взаємозв'язку між умовами синтезу порошків, структурою матеріалу та характеристиками гарячепресованої кераміки потребують подальших досліджень.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження особливостей формування наноструктурованої кераміки на основі стабілізованого діоксиду цирконію, синтезованого комбінованим методом сумісного осадження та гідротермального розкладання, що дасть змогу встановити закономірності впливу характеристик нанопорошків і режимів гарячого пресування на структуру та фізико-механічні властивості отриманих композитів. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– синтезувати нанокристалічний порошок складу $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ і дослідити його фазовий склад, морфологію і дисперсність;

– визначити оптимальні параметри гарячого пресування на підставі дилатометричних досліджень і дослідити особливості формування структури кераміки;

– встановити фізико-механічні характеристики гарячепресованої кераміки та оцінити ефективність застосованого методу синтезу і консолідації.

Основна частина дослідження. Як вихідні матеріали для отримання нанорозмірного порошку $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ використовували нітрат цирконію $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \times \text{H}_2\text{O}$, ацетат ітрію $\text{Y}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \times \text{H}_2\text{O}$ та аміак NH_4OH як осаджувач. Як поверхнево-активну речовину використовували оксиетильований нонилфенол. Синтез порошків здійснювали комбінованим методом сумісного осадження з подальшим гідротермальним розкладанням отриманих гідроксидів.

Фазовий склад синтезованого порошку після прокалювання визначали методом рентгенофазового аналізу на дифрактометрі Rigaku Ultima IV із використанням $\text{CuK}\alpha$ -випромінювання та Ni -фільтра. Для визначення елементного складу матеріалу використовували рентгеноспектральний аналіз із застосуванням растрового іонно-електронного мікроскопа Quanta 200 3D. Форму та розміри частинок порошку визначали методом просвічувальної електронної мікроскопії з використанням мікроскопа JEM-2100.

Щільність синтезованих порошків і кераміки визначали методом гелієвої пікнометрії на приладі Ассурус II 1340. Характер і температурні інтервали спікання досліджували за допомогою високотемпературного дилатометра Netzsch L75HX1550. Нагрівали в діапазоні температур 20–1550 °C зі швидкістю 20 °C/хв із витримкою 120 хв за максимальної температури.

Гаряче пресування проводили із застосуванням установки гарячого пресування з прямим пропусканням високострумowego електричного струму через графітову прес-форму [54, 55]. Досліджували структуру гарячепресованої кераміки методами атомно-силової мікроскопії на мікроскопі Ntegra Aura і растрової електронної мікроскопії на мікроскопі Nova NanoSEM. Мікротвердість визначали методом Віккерса за допомогою автоматичного мікротвердоміра AFFRI DM8 за навантаження 1 кг і тривалості навантаження 15 с. Одновісні випробування

на стиск проводили за кімнатної температури на випробувальній машині Instron 300LX.

За результатами рентгенофазового аналізу встановлено, що синтезований порошок є однофазним твердим розчином $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ із тетрагональною кристалічною ґраткою та просторовою групою P42/nmc (рис. 1). Параметри елементарної комірки становлять: $a = b = 3,6020 \text{ \AA}$; $c = 5,1790 \text{ \AA}$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Отримані результати свідчать про формування стабілізованої тетрагональної фази діоксиду цирконію.

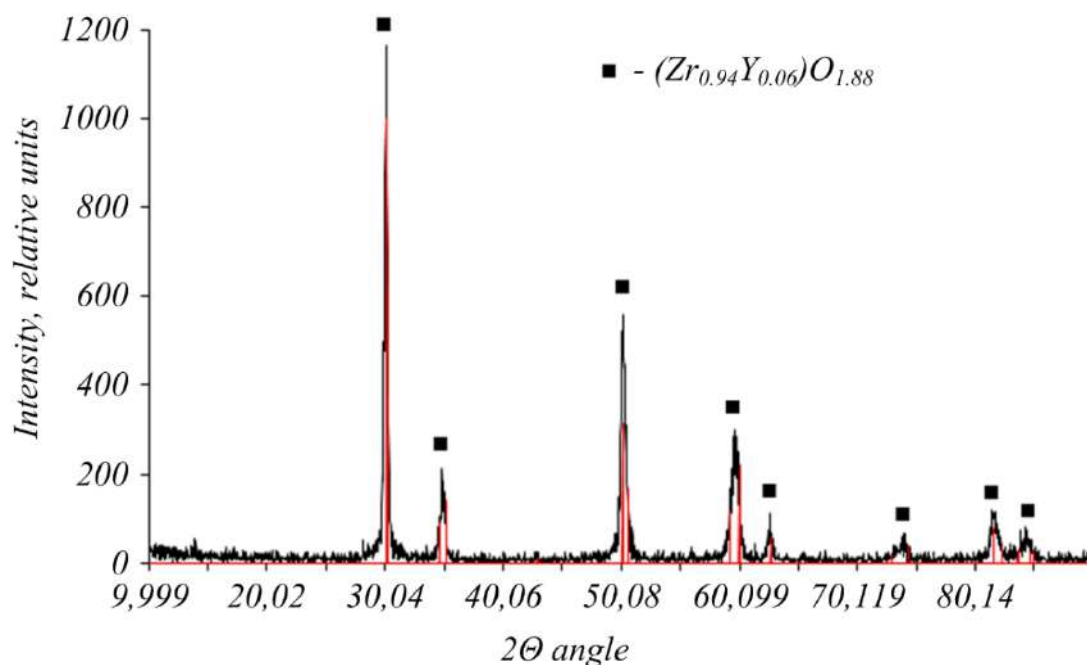


Рис. 1. Рентгенограма синтезованого порошку $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ після гідротермального розкладання спільноосаджених гідроксидів ітрію та цирконію

За даними рентгеноспектрального аналізу встановлено відповідність елементного складу синтезованого матеріалу заданому стехіометричному складу $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ (рис. 2), що підтверджує ефективність використаного методу синтезу та високу однорідність розподілу компонентів.

Дослідження порошку методом просвічуальної електронної мікроскопії

показало, що синтезований матеріал складається переважно зі сферичних наночастинок розміром 3–15 нм (рис. 3). Водночас розмір слабкозв'язаних агрегатів не перевищує 500 нм. Формування слабкоагломерованої структури є важливим фактором для забезпечення ефективного ущільнення порошків у процесі гарячого пресування [56, 57].

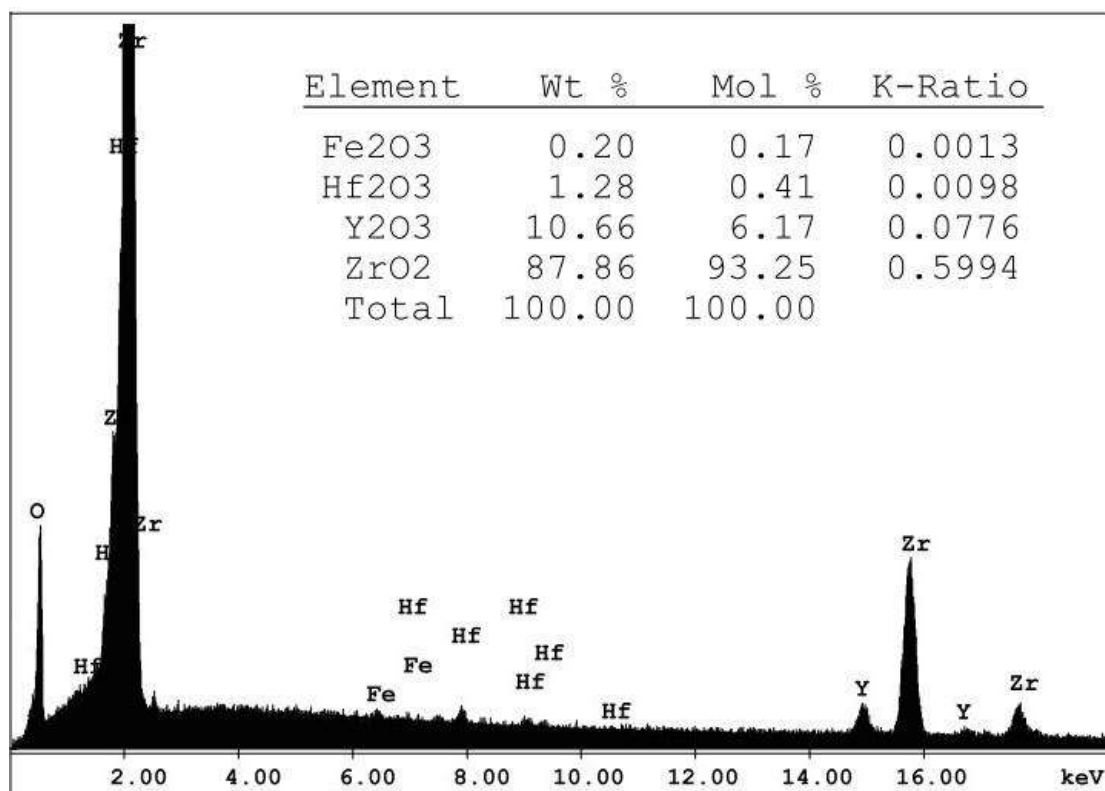


Рис. 2. EDAX аналіз порошку $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ після гідротермального розкладання спільноосаджених гідроксидів ітрію та цирконію

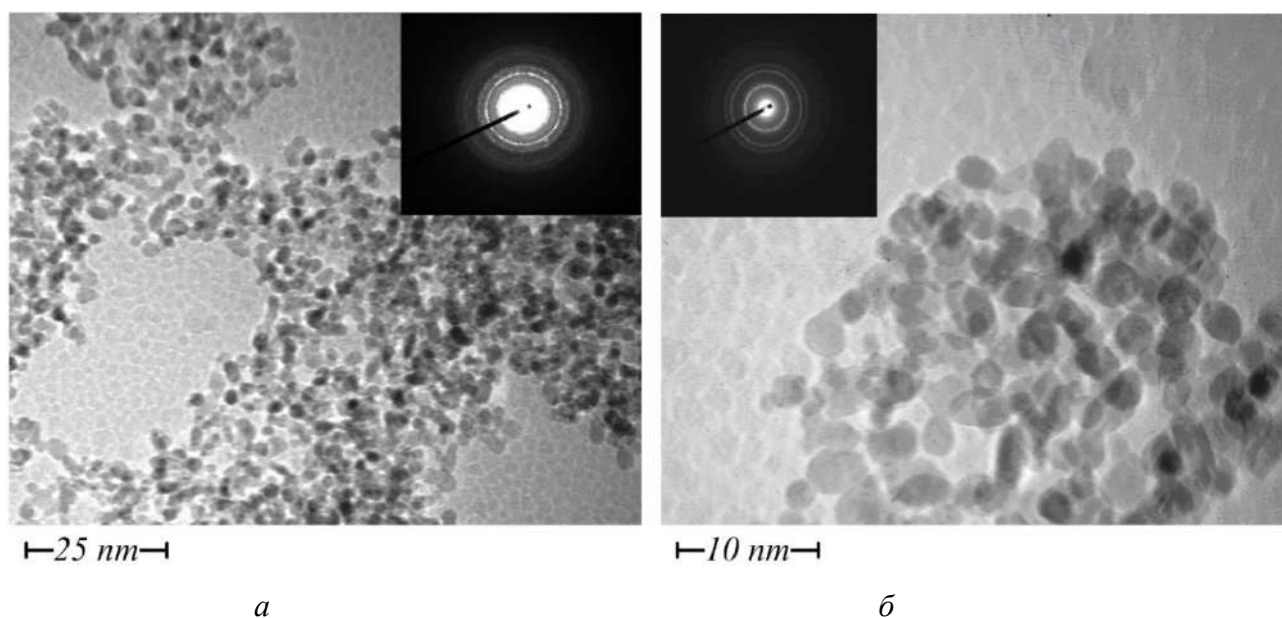


Рис. 3. ПЕМ зображення синтезованих наночастинок порошку $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$:
a – 350 °C, 250 bar; *б* – 215 °C, 100 bar

Дослідження щільності синтезованих порошків методом гелієвої пікнометрії показало, що їхня щільність перевищує 90 % теоретичної щільності діоксиду цирконію. Отримані результати свідчать про наявність розвиненої пористої структури та адсорбованої води на поверхні наночастинок. Пористість таких

порошків формується як за рахунок проміжків між первинними наночастинками, так і внаслідок наявності замкнених пор у складі агрегатів.

Характер спікання синтезованого нанорозмірного порошку $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ наведено на рис. 4.

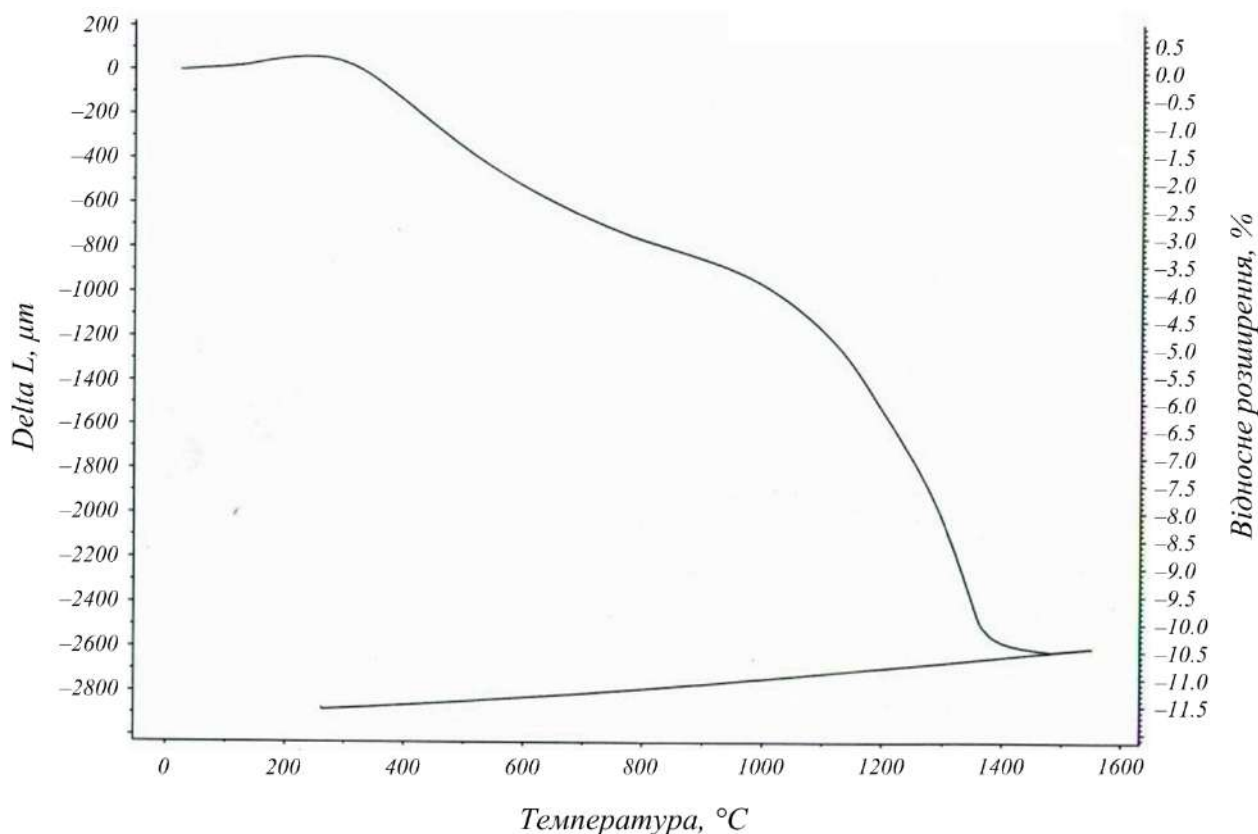


Рис. 4. Зміна геометричних розмірів компакту з нанопорошку $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ від температури

Аналіз результатів дилатометричних досліджень показав, що максимальна усадка зразків спостерігають до температури 1500 °C. При цьому усадка в інтервалі температур 1400–1500 °C становить лише близько 2 %, що свідчить про завершення основних процесів ущільнення. На підставі отриманих результатів як оптимальні параметри гарячого пресування було вибрано температуру 1200 °C, що становить

приблизно 80 % температури повної усадки, і витримку 5 хв.

На рис. 5 наведено результати дослідження структури гарячепресованої кераміки $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$, отримані методом атомно-силової мікроскопії. Встановлено формування щільної наноструктурованої кераміки з однорідним розподілом структурних складових. Середній розмір структурних елементів становить 50–200 нм.

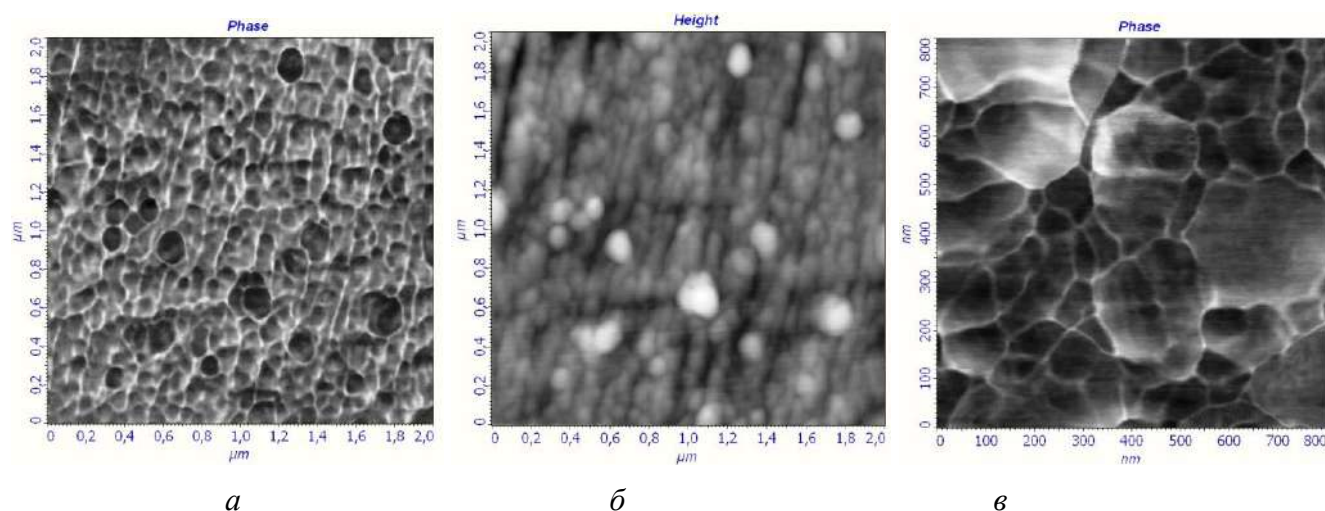


Рис. 5. АСМ зображення гарячепресованої кераміки $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ за температури 1200 °С:
 а – скан 2×2 мкм (режим фазового контрасту); б – скан 2×2 мкм (2D режим);
 в – скан 800×800 нм (режим фазового контрасту)

Результати растрової електронної мікроскопії (рис. 6) підтверджують формування щільної дрібнозернистої структури без виражених дефектів і значної міжзеренної пористості.

Результати дослідження фізико-механічних характеристик гарячепресованої кераміки наведено в таблиці. Встановлено, що отримані зразки мають високу щільність,

яка досягає 98 % теоретичної, мікротвердість 1408 HV і межу міцності на стиск 2586 МПа. Отримані результати свідчать про ефективність використання нанокристалічних порошків, синтезованих методом сумісного осадження та гідротермального розкладання, для формування високощільної наноструктурованої цирконієвої кераміки.

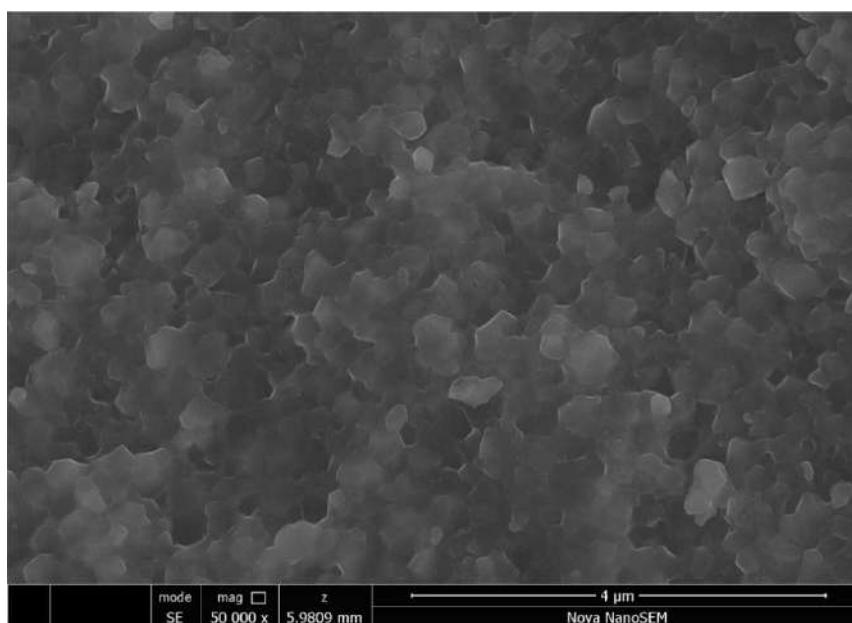


Рис. 6. РЕМ зображення гарячепресованої кераміки $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$ за температури 1200 °С

Таблиця

Результати дослідження пікнометричної щільності та механічних характеристик
гарячепресованої кераміки $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$

Мікротвердість, HV	Міцність на стиск, МПа	Щільність пікнометрична, г/см ³	Щільність відносно теоретичної, %
1408	2586	6,08	98

Отже, використання комбінованого методу синтезу забезпечує високий ступінь гомогенності вихідних компонентів і формування слабкоагломерованих нанокристалічних частинок ZrO_2 . Це сприяє отриманню однорідної тонкодисперсної структури композитного матеріалу в разі гарячого пресування з прямим пропусканням струму та забезпечує формування високощільної кераміки вже за температури 1200 °C.

Висновки. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– комбінованим методом сумісного осадження та гідротермального розкладання синтезовано нанокристалічний порошок складу $(\text{Zr}_{0.94}\text{Y}_{0.06})\text{O}_{1.88}$, який має однофазну тетрагональну структуру, сферичну форму частинок із розміром 3–15 нм;

– за результатами дилатометричних досліджень встановлено оптимальні параметри гарячого пресування нанопорошків: температура 1200 °C і витримка 5 хв, що забезпечують

формування щільної наноструктурованої кераміки із середнім розміром структурних елементів 50–200 нм;

– встановлено, що горячепресована кераміка має високі фізико-механічні властивості: відносна щільність становить 98 % теоретичної, мікротвердість – 1408 HV, а межа міцності на стиск – 2586 МПа, що підтверджує ефективність застосованого методу синтезу та консолідації нанокристалічних порошків діоксиду цирконію.

Фінансування. Статтю підготовлено в межах виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Науково-технологічні основи створення наноконпозиційної кераміки поліфункціонального призначення з високими фізико-механічними властивостями за рахунок методу електроконсолідації» (ДРН 0126U002110) за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України.

Список використаних джерел

1. Mamalis, A. G., Hevorkian, E. S., Nerybatskyi, V. P., Rucki, M., Krzysiak, Z., & Morozova, O. M. (2023). Effect of nanoadditives on the properties of partially stabilized zirconia. *Nanotechnology Perceptions*. Vol. 19, No. 3. P. 26–46. <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v19i3.325>
2. Matsui, K., Hosoi, K., Feng, B., Yoshida, H. & Ikuhara, Y. (2023). Ultrahigh toughness zirconia ceramics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 120, No. 27. e2304498120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2304498120>
3. Hevorkian, E. S., Morozova, O. M., Nerubatskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Sofronov, D. S., Moya, S., Abarrategi, A., Arnaiz, B., Bondarenko, M. A., & Vovk, R. V. (2024). Composite material based on zirconium dioxide partially stabilised with cerium oxide and aluminium oxide for bioengineering applications. *Functional Materials*. Vol. 31, No. 3. P. 351–358. <https://doi.org/10.15407/fm31.03.351>

4. Bapat, R. A., Yang, H. J., Chaubal, T. V., Dharmadhikari, S., Abdulla, A. M., Arora, S., Rawal, S., & Kesharwani, P. (2022). Review on synthesis, properties and multifarious therapeutic applications of nanostructured zirconia in dentistry. *RSC Advances*. Vol. 12. P. 12773–12793. <https://doi.org/10.1039/D2RA00006G>
5. Нерубацький, В. П., Геворкян, Е. С., Комарова, Г. Л., & Волошина, Л. В. (2025). Дослідження впливу нанодобавок на фізико-хімічні властивості частково стабілізованого діоксиду цирконію, що використовується у функціональних матеріалах транспортного призначення. *Тези доповідей 6-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Інтелектуальні транспортні технології»* (Харків, УкрДУЗТ, 24–26 листопада 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ. С. 292–294.
6. Gevorkyan, E. S., Sofronov, D. S., Nerubatskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Morozova, O. M., Lebedynskyi, O. M., & Mateychenko, P. V. (2023). A study on the formation and sintering of powders synthesized from ZrO_2 micro- and nanoparticles from fluoride solutions. *Journal of Superhard Materials*. Vol. 45, Iss. 1. P. 31–45. <https://doi.org/10.3103/S1063457623010057>
7. Zhang, X., Wu, X., & Shi, J. (2020). Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 9, Iss. 4. P. 9029–9048. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.131>
8. Motoc, A. M., Valsan, S., Slobozeanu, A. E., Corban, M., Valerini, D., Prakasam, M., Botan, M., Dragut, V., Vasile, B. S., Surdu, A. V., Trusca, R., Grill, M. L., & Piticescu, R. R. (2020). Design, fabrication, and characterization of new materials based on zirconia doped with mixed rare earth oxides: Review and first experimental results. *Metals*. Vol. 10, Iss. 6. 746. <https://doi.org/10.3390/met10060746>
9. Dobbins, T. A., Knight, R., & Mayo, M. J. (2003). HVOF thermal spray deposited Y_2O_3 -stabilized ZrO_2 coatings for thermal barrier applications. *Journal of Thermal Spray Technology*. Vol. 12. P. 214–225. <https://doi.org/10.1361/105996303770348320>
10. Paz Alpuche, E., Gröger, P., Wang, X., Kroyer, T., & Fasoulas, S. (2021). Influence of the Sputtering Technique and Thermal Annealing on YSZ Thin Films for Oxygen Sensing Applications. *Coatings*. Vol. 11, Iss. 10. 1165. <https://doi.org/10.3390/coatings11101165>
11. Ratov, B. T., Mechnik, V. A., Bondarenko, N. A., Kolodnitskyi, V. M., Gevorkyan, E. S., Nerubatskyi, V. P., Gusmanova, A. G., Fedorov, B. V., Kaldibaev, N. A., Arshidinova, M. T., & Kulych, V. G. (2023). Features structure of the $C_{diamond}-(WC-Co)-ZrO_2$ composite fracture surface as a result of impact loading. *Journal of Superhard Materials*. Vol. 45, Iss. 5. P. 348–359. <https://doi.org/10.3103/S1063457623050088>
12. Ratov, B. T., Hevorkian, E., Mechnik, V. A., Bondarenko, N. A., Kolodnitskyi, V. M., Prikhna, T. O., Moshchil, V. E., Nerubatskyi, V. P., Kalzhanova, A. B., Bayamirova, R. U., Togasheva, A. R., & Sarbopeeveva, M. D. (2024). Effect of the ZrO_2 content on the strength characteristics of the matrix material of $C_{diamond}-(WC-Co)$ composites synthesized by spark plasma sintering. *Journal of Superhard Materials*. Vol. 46, Iss. 3. P. 175–186. <https://doi.org/10.3103/S1063457624030079>
13. Biswas, M., Ojha, P. K., Jayasingh, E. M., & Prasad, C. D. (2011). Synthesis of nanocrystalline yttria stabilized zirconia for SOFC. *Nanomaterials and Nanotechnology*. Vol. 1, No. 2. P. 55–58. <https://doi.org/10.5772/50961>
14. Manabe, K., Echigo, M., Tsuda, Y., Minami, K., Akedo, J., & Ohnishi, H. (2023). Formation of dense yttria-stabilized zirconia thin film by aerosol deposition method for metal-supported solid oxide fuel cell applications. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. Vol. 56, Iss. 1. 2261771. <https://doi.org/10.1080/00219592.2023.2261771>
15. Miura, N., Sato, T., Anggraini, S. A., Ikeda, H., & Zhuiykov, S. (2014). A review of mixed-potential type zirconia-based gas sensors. *Ionics*. Vol. 20. P. 901–925. <https://doi.org/10.1007/s11581-014-1140-1>

16. Yan, Y., Ma, Z., Sun, J., Bu, M., Huo, Y., Wang, Z., Li, Y., & Hu, N. (2021). Surface microstructure-controlled ZrO₂ for highly sensitive room-temperature NO₂ sensors. *Nano Materials Science*. Vol. 3, Iss. 3. P. 268–275. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.02.001>
17. Yin, L., Nakanishi, Y., Alao, A.-R., Song, X.-F., Abduo, J., & Zhang, Y. (2017). A review of engineered zirconia surfaces in biomedical applications. *Procedia CIRP*. Vol. 65. P. 284–290. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.04.057>
18. Han, M. K. (2024). Advances and challenges in zirconia-based materials for dental applications. *Journal of the Korean Ceramic Society*. Vol. 61. P. 783–799. <https://doi.org/10.1007/s43207-024-00416-7>
19. Su, G., Zhang, Y., Jin, C., Zhang, Q., Lu, J., Liu, Z., Wang, Q., Zhang, X., & Ma, J. (2023). 3D printed zirconia used as dental materials: a critical review. *Journal of Biological Engineering*. Vol. 17. 78. <https://doi.org/10.1186/s13036-023-00396-y>
20. Lin, H., Yin, C., & Mo, A. (2021). Zirconia based dental biomaterials: Structure, mechanical properties, biocompatibility, surface modification, and applications as implant. *Frontiers in Dental Medicine*. Vol. 2. 689198. <https://doi.org/10.3389/fdmed.2021.689198>
21. Нерубацький, В. П., Геворкян, Е. С., & Комарова, Г. Л. (2026). Сучасні технології створення поліфункціональної нанокераміки ZrO₂–WC для підвищення ресурсу деталей промислового обладнання і транспорту. *Матеріали 26-го Міжнар. наук.-техн. семінару «Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті»* (Київ, Асоціація технологів-машинобудівників України, 31 березня – 02 квітня 2026 р.). Київ: АТМ України; Житомир: ПП «Рута». С. 93–95.
22. Нерубацький, В. П., Геворкян, Е. С., Чишкала, В. О., & Комарова, Г. Л. (2026). Дослідження фізико-механічних властивостей наноконпозиційної кераміки ZrO₂(3 мол.% Y₂O₃)–WC для високонавантажених вузлів машин і транспортних систем оборонного призначення. *Тези доповідей XXXIV Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. MicroCAD 2026»* (Харків, НТУ «ХПІ», 13–16 травня 2026 р.). Харків: НТУ «ХПІ». С. 622.
23. Meyers, M. A., Mishra, A., & Benson, D. J. (2006). Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*. Vol. 51, Iss. 4. P. 427–556. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2005.08.003>
24. Koch, C. C. (2003). Optimization of strength and ductility in nanocrystalline and ultrafine grained metals. *Scripta Materialia*. Vol. 49, Iss. 7. P. 657–662. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(03\)00394-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00394-4)
25. Nerubatskyi, V. P., Vovk, R. V., Gevorkyan, E. S., Hordiienko, D. A., Nazyrov, Z. F., & Komarova, H. L. (2023). Investigation of phase and structural states in nanocrystalline powders based on zirconium dioxide. *Low Temperature Physics*. Vol. 49, No. 11. P. 1277–1282. <https://doi.org/10.1063/10.0021374>
26. Gevorkyan, E., Nerubatskyi, V., Chyshkala, V., & Morozova, O. (2021). Revealing specific features of structure formation in composites based on nanopowders of synthesized zirconium dioxide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5, No. 12 (113). P. 6–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242503>
27. Hevorkian, E. S., Nerubatskyi, V. P., Rucki, M., Kilikevicius, A., Mamalis, A. G., Samociuk, W., & Morozow, D. (2024). Electroconsolidation method for fabrication of fine-dispersed high-density ceramics. *Nanotechnology Perceptions*. Vol. 20, No. 1. P. 100–113. <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v20i1.363>
28. Krzysiak, Z., Gevorkyan, E., Nerubatskyi, V., Rucki, M., Chyshkala, V., Caban, J., & Mazur, T. (2022). Peculiarities of the phase formation during electroconsolidation of Al₂O₃–SiO₂–ZrO₂ powders mixtures. *Materials*. Vol. 15, Iss. 17. 6073. <https://doi.org/10.3390/ma15176073>

29. Hevorkian, E. S., Nerubaskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Lytovchenko, S. V., Prokopiv, M. M., Samociuk, W., & Mechnik, V. A. (2024). Technological and innovative features of the electroconsolidation method as a kind of plasma sintering for refractory compounds. *Journal of Superhard Materials*. Vol. 46, Iss. 5. P. 364–375. <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>
30. Tyagi, B., Sidhpuria, K., Shaik, B., & Vir Jasra, R. (2006). Synthesis of nanocrystalline zirconia using sol–gel and precipitation techniques. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Vol. 45, Iss. 25. P. 8643–8650. <https://doi.org/10.1021/ie060519p>
31. Chang, Y., Wang, C., Liang, T., Zhao, C., Luo, X., Guo, T., Gong, J., & Wu, H. (2015). Sol–gel synthesis of mesoporous spherical zirconia. *RSC Advances*. Vol. 5. 104629. <https://doi.org/10.1039/c5ra23782c>
32. Liu, L., Wang, S., Zhang, B., Jiang, G., Yang, J., Li, Y., Liu, W., Wang, J., & Kong, W. (2022). From modification to mechanism: Supercritical hydrothermal synthesis of nano-zirconia. *Ceramics International*. Vol. 48, Iss. 4. P. 4401–4423. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.028>
33. Garanin, Y., Shakirzyanov, R., Borgekov, D., Kozlovskiy, A., Volodina, N., Shlimas, D., & Zdorovets M. (2024). Study of morphology, phase composition, optical properties, and thermal stability of hydrothermal zirconium dioxide synthesized at low temperatures. *Scientific Reports*. Vol. 14. 29398. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80399-x>
34. Seisenbaeva, G. A., Dudarko, O. A., & Kessler, V. G. (2019). Hierarchically porous zirconia through precursor-directed large-scale synthesis. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. Vol. 90. P. 140–148. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4836-2>
35. Fariñas, J. C. (2025). Microwave-assisted hydrothermal synthesis of nanocrystalline zirconia Síntesis hidrotermal asistida por microondas de circonia nanocristalina. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. Vol. 64, Iss. 4. 100445. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2025.100445>
36. Biswas, M., Ojha, P. K., & Prasad, C. D. (2011). Synthesis of nanocrystalline yttria stabilized zirconia for SOFC. *Nanomaterials and Nanotechnology*. Vol. 1. <https://doi.org/10.5772/50961>
37. Tahmasebpour, M., Babaluo, A. A., & Razavi Aghjeh, M. K. (2008). Synthesis of zirconia nanopowders from various zirconium salts via polyacrylamide gel method. *Journal of the European Ceramic Society*. Vol. 28, Iss. 4. P. 773–778. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.09.018>
38. Yang, C., Jin, Z., Chen, X., Fan, J., Qiu, M., Fu, K., & Fan, Y. (2021). Modified wet chemical method synthesis of nano-ZrO₂ and its application in preparing membranes. *Ceramics International*. Vol. 47, Iss. 10, Part A. P. 13432–13439. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.201>
39. Bumajdad, A., Nazeer, A. A., Al Sagheer, F., Nahar, S., & Zaki, M. I. (2018). Controlled synthesis of ZrO₂ nanoparticles with tailored size, morphology and crystal phases via organic/inorganic hybrid films. *Scientific Reports*. Vol. 8. 3695. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22088-0>
40. Stolzenburg, P., Freytag, A., Bigall, N. C., & Garnweitner, G. (2016). Fractal growth of ZrO₂ nanoparticles induced by synthesis conditions. *CrystEngComm*. Vol. 18. P. 8396–8405. <https://doi.org/10.1039/C6CE01916A>
41. Foo, Y. T., Abdullah, A. Z., Horri, B. A., & Salamatina, B. (2019). Optimised co-precipitation synthesis condition for oxalate-derived zirconia nanoparticles. *Ceramics International*. Vol. 45, Iss. 17, Part B. P. 22930–22939. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.336>
42. Piticescu, R., Monty, C., & Millers, D. (2005). Hydrothermal synthesis of nanostructured zirconia materials: Present state and future prospects. *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 109, Iss. 1. P. 102–106. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.03.092>

43. Alresheedi, F. (2025). Hydrothermal sol–gel synthesis of zirconium dioxide (ZrO_2) nanoparticles for enhanced degradation of Congo Red. *Results in Physics*. Vol. 79. 108521. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2025.108521>
44. Li, Q., Wang, Z., & Wang, X. (2023). CFD–PBM simulation for continuous hydrothermal flow synthesis of zirconia nanoparticles in a confined impinging jet reactor. *Materials*. Vol. 16, Iss. 9. 3421. <https://doi.org/10.3390/ma16093421>
45. Itagaki, Y., Takemoto, M., Murata, H., Kanzawa, T., Tokudome, Y., & Nakahira, A. (2022). Supercritical hydrothermal synthesis of zirconia nanoparticles from zirconium basic carbonate. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. Vol. 130, Iss. 11. P. 861–866. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.22083>
46. Liu, S., Wang, J., Chen, Y., Song, Z., Han, B., Wu, H., Zhang, T., & Liu, M. (2023). Tetragonal nanosized zirconia: Hydrothermal synthesis and its performance as a promising ceramic reinforcement. *Inorganics*. Vol. 11, Iss. 5. 217. <https://doi.org/10.3390/inorganics11050217>
47. Pyda, W., Haberko, K., & Bułko, M. M. (1991). Hydrothermal crystallization of zirconia and zirconia solid solutions. *The American Ceramic Society*. Vol. 74, Iss. 10. P. 2622–2629. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1991.tb06810.x>
48. Dell'Agli, G., Mascolo, G., Mascolo, M. C., & Pagliuca, C. (2006). Weakly-agglomerated nanocrystalline $(\text{ZrO}_2)_{0.9}(\text{Yb}_2\text{O}_3)_{0.1}$ powders hydrothermally synthesized at low temperature. *Solid State Sciences*. Vol. 8, Iss. 9. P. 1046–1050. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2006.03.009>
49. Zhang, Y.-W., Sun, X., Xu, G., Tian, S.-J., Liao, C.-S., & Yan, C.-H. (2003). Co-doping effects of Y^{3+} and Sc^{3+} on the crystal structures, nanoparticle properties and electrical behavior of ZrO_2 solid solutions prepared by a mild urea-based hydrothermal method. *Physical Chemistry Chemical Physics*. Vol. 5, Iss. 10. P. 2129–2134. <https://doi.org/10.1039/b301074k>
50. Dudnik, E. V., Shevchenko, A. V., Ruban, A. K., Red'ko, V. P., & Lopato, L. M. (2010). Effect of Al_2O_3 on the properties of nanocrystalline $\text{ZrO}_2 + 3 \text{ mol } \% \text{ Y}_2\text{O}_3$ powder. *Inorganic Materials*. Vol. 46. P. 172–176. <https://doi.org/10.1134/S0020168510020159>
51. Garg, N., Mittal, V. K., Bera, S., Dasgupta, A., & Sankaralingam, V. (2012). Preparation and characterization of tetragonal dominant nanocrystalline ZrO_2 obtained via direct precipitation. *Ceramics International*. Vol. 38, Iss. 3. P. 2507–2512. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.11.020>
52. Mamalis, A., Hevorkian, E., Nerubatskyi, V., Krzysiak, Z., Morozova, O., & Chalko, L. (2023). Peculiarities of obtaining nanostructured materials compacted by the method of hot pressing due to the passage of direct electric current. *Book of Abstracts of the of the 12th Japanese-Mediterranean Workshop Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (JAPMED'12)* (Batumi, Ajara Autonomous Republic, Batumi Shota Rustaveli State University, July 17–20, 2023). P. 66–67.
53. Gevorkyan, E., Morozova, O., Chyshkala, V., & Nerubatskyi, V. (2023). Nanostructured materials compacted via hot pressing method by direct current transmission. *Book of Abstracts of the 8th International Materials Science Conference HighMatTech-2023* (Kyiv, October 2–6, 2023). P. 38.
54. Hevorkian, E., Samociuk, W., Rucki, M., Krzysiak, Z., Pieniak, D., Nerubatskyi, V., Chyshkala, V., Lytovchenko, S., Chalko, L., Morozow, D., Caban, J., & Kulich, V. (2025). Microstructure and properties of binderless μWC obtained using the electroconsolidation method. *Materials*. Vol. 18, Iss. 20. 4646. <https://doi.org/10.3390/ma18204646>
55. Hevorkian, E., Michalczewski, R., Rucki, M., Sofronov, D., Osuch-Słomka, E., Nerubatskyi, V., Krzysiak, Z., & Latosińska, J. N. (2024). Effect of the sintering parameters on the structure and mechanical properties of zirconia-based ceramics. *Ceramics International*. Vol. 50, Iss. 19, Part A. P. 35226–35235. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.06.331>
-

56. Kocjan, A., Logar, M., & Shen, Z. (2017). The agglomeration, coalescence and sliding of nanoparticles, leading to the rapid sintering of zirconia nanoceramics. *Scientific Reports*. Vol. 7. 2541. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02760-7>

57. Fan, J., Liu, D., Zhao, K., Liu, J., & An, L. (2023). Densification kinetics and mechanism of zirconia ceramics via hot oscillating pressing. *Open Ceramics*. Vol. 13. 100323. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100323>

Reference

1. Mamalis, A. G., Hevorkian, E. S., Nerybatskyi, V. P., Rucki, M., Krzysiak, Z., & Morozova O. M. (2023). Effect of nanoadditives on the properties of partially stabilized zirconia. *Nanotechnology Perceptions*, 19 (3), 26–46. <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v19i3.325>

2. Matsui, K., Hosoi, K., Feng, B., Yoshida, H., & Ikuhara, Y. (2023). Ultrahigh toughness zirconia ceramics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120 (27), e2304498120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2304498120>

3. Hevorkian, E. S., Morozova, O. M., Nerubatskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Sofronov, D. S., Moya, S., Abarrategi, A., Arnaiz, B., Bondarenko, M. A., & Vovk R. V. (2024). Composite material based on zirconium dioxide partially stabilised with cerium oxide and aluminium oxide for bioengineering applications. *Functional Materials*, 3 1(3), 351–358. <https://doi.org/10.15407/fm31.03.351>

4. Bapat, R. A., Yang, H. J., Chaubal, T. V., Dharmadhikari, S., Abdulla, A. M., Arora, S., Rawal, S., & Kesharwani, P. (2022). Review on synthesis, properties and multifarious therapeutic applications of nanostructured zirconia in dentistry. *RSC Advances*, 12, 12773–12793. <https://doi.org/10.1039/D2RA00006G>

5. Nerubatskyi, V. P., Hevorkian, E. S., Komarova, H. L., & Voloshyna, L. V. (2025). Doslidzhennia vplyvu nanodobavok na fizyko-khimichni vlastyvoli chastkovo stabilizovanoho dioksydu tsyrkoniiu, shcho vykorystovuietsia u funktsionalnykh materialakh transportnoho pryznachennia [Study of the effect of nanoadditives on the physicochemical properties of partially stabilized zirconium dioxide used in functional materials for transport applications]. Proceedings of the 6th International Scientific and Technical Conference «*Intelligent Transport Technologies*» (Kharkiv, USURT, November 24–26, 2025). Kharkiv: USURT. 292–294 [in Ukrainian].

6. Gevorkyan, E. S., Sofronov, D. S., Nerubatskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Morozova, O. M., Lebedynskyi, O. M., & Mateychenko, P. V. (2023). A study on the formation and sintering of powders synthesized from ZrO₂ micro- and nanoparticles from fluoride solutions. *Journal of Superhard Materials*, 45 (1), 31–45. <https://doi.org/10.3103/S1063457623010057>

7. Zhang, X., Wu, X., & Shi, J. (2020). Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (4), 9029–9048. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.131>

8. Motoc, A. M., Valsan, S., Slobozeanu, A. E., Corban, M., Valerini, D., Prakasam, M., Botan, M., Dragut, V., Vasile, B. S., Surdu, A. V., Trusca, R., Grilli, M. L., & Piticescu, R. R. (2020). Design, fabrication, and characterization of new materials based on zirconia doped with mixed rare earth oxides: Review and first experimental results. *Metals*, 10 (6), 746. <https://doi.org/10.3390/met10060746>

9. Dobbins, T. A., Knight, R., & Mayo, M. J. (2003). HVOF thermal spray deposited Y₂O₃-stabilized ZrO₂ coatings for thermal barrier applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 12, 214–225. <https://doi.org/10.1361/105996303770348320>

10. Paz Alpuche, E., Gröger, P., Wang, X., Kroyer, T., & Fasoulas, S. (2021). Influence of the Sputtering Technique and Thermal Annealing on YSZ Thin Films for Oxygen Sensing Applications.

Coatings, 11 (10), 1165. <https://doi.org/10.3390/coatings11101165>

11. Ratov, B. T., Mechnik, V. A., Bondarenko, N. A., Kolodnitskyi, V. M., Gevorkyan, E. S., Nerubaskyi, V. P., Gusmanova, A. G., Fedorov, B. V., Kaldibaev, N. A., Arshidinova, M. T., & Kulych, V. G. (2023). Features structure of the $C_{diamond}-(WC-Co)-ZrO_2$ composite fracture surface as a result of impact loading. *Journal of Superhard Materials*, 45 (5), 348–359. <https://doi.org/10.3103/S1063457623050088>

12. Ratov, B. T., Hevorkian, E., Mechnik, V. A., Bondarenko, N. A., Kolodnitskyi, V. M., Prikhna, T. O., Moshchil, V. E., Nerubaskyi, V. P., Kalzhanova, A. B., Bayamirova, R. U., Togasheva, A. R., & Sarbopeeveva, M. D. (2024). Effect of the ZrO_2 content on the strength characteristics of the matrix material of $C_{diamond}-(WC-Co)$ composites synthesized by spark plasma sintering. *Journal of Superhard Materials*, 46 (3), 175–186. <https://doi.org/10.3103/S1063457624030079>

13. Biswas, M., Ojh, P. K., Jayasingh, E. M., & Prasad, C. D. (2011). Synthesis of nanocrystalline yttria stabilized zirconia for SOFC. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 1 (2), 55–58. <https://doi.org/10.5772/50961>

14. Manabe, K., Echigo, M., Tsuda, Y., Minami, K., Akedo, J., & Ohnishi, H. (2023). Formation of dense yttria-stabilized zirconia thin film by aerosol deposition method for metal-supported solid oxide fuel cell applications. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 56 (1), 2261771. <https://doi.org/10.1080/00219592.2023.2261771>

15. Miura, N., Sato, T., Anggraini, S. A., Ikeda, H., & Zhuiykov, S. (2014). A review of mixed-potential type zirconia-based gas sensors. *Ionics*, 20, 901–925. <https://doi.org/10.1007/s11581-014-1140-1>

16. Yan, Y., Ma, Z., Sun, J., Bu, M., Huo, Y., Wang, Z., Li, Y., & Hu, N. (2021). Surface microstructure-controlled ZrO_2 for highly sensitive room-temperature NO_2 sensors. *Nano Materials Science*, 3 (3), 268–275. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.02.001>

17. Yin, L., Nakanishi, Y., Alao, A.-R., Song, X.-F., Abduo, J., & Zhang, Y. (2017). A review of engineered zirconia surfaces in biomedical applications. *Procedia CIRP*, 65, 284–290. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.04.057>

18. Han, M. K. (2024). Advances and challenges in zirconia-based materials for dental applications. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 61, 783–799. <https://doi.org/10.1007/s43207-024-00416-7>

19. Su, G., Zhang, Y., Jin, C., Zhang, Q., Lu, J., Liu, Z., Wang, Q., Zhang, X., & Ma, J. (2023). 3D printed zirconia used as dental materials: a critical review. *Journal of Biological Engineering*, 17, 78. <https://doi.org/10.1186/s13036-023-00396-y>

20. Lin, H., Yin, C., & Mo, A. (2021). Zirconia based dental biomaterials: Structure, mechanical properties, biocompatibility, surface modification, and applications as implant. *Frontiers in Dental Medicine*, 2, 689198. <https://doi.org/10.3389/fdmed.2021.689198>

21. Nerybatskyi, V. P., Hevorkian, E. S., & Komarova, H. L. (2026). Suchasni tekhnolohii stvorennia polifunktsionalnoi nanokeramiky ZrO_2-WC dlia pidvyshchennia resursu detalei promyslovoho obladnannia i transport [Modern technologies for the fabrication of multifunctional ZrO_2-WC nanoceramics to improve the service life of industrial equipment and transport components]. Proceedings of the 26th International Scientific and Technical Seminar «Current Issues of Production and Repair in Industry and Transport» (Kyiv, Association of Mechanical Engineering Technologists of Ukraine, March 31 – April 02, 2026). Kyiv: Association of Mechanical Engineering Technologists of Ukraine; Zhytomyr: PE «Ruta». 93–95 [in Ukrainian].

22. Nerubatskyi, V. P., Hevorkian, E. S., Chyshkala, V. O., & Komarova, H. L. (2026). Doslidzhennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei nanokompozytsiinoi keramiky $ZrO_2(3 \text{ mol.}\% Y_2O_3)-WC$ dlia vysokonavantazhenykh vuzliv mashyn i transportnykh system

oboronnoho pryznachennia [Study of the physicomachanical properties of $\text{ZrO}_2(3 \text{ mol.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3)\text{--WC}$ nanocomposite ceramics for highly loaded units of machines and defense transport systems]. Proceedings of the XXXIV International Scientific and Practical Conference «*Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health. MicroCAD 2026*» (Kharkiv, NTU «KhPI», May 13–16, 2026). Kharkiv: NTU «KhPI». 622 [in Ukrainian].

23. Meyers, M. A., Mishra, A., & Benson, D. J. (2006). Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, 51 (4), 427–556. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2005.08.003>

24. Koch, C. C. (2003). Optimization of strength and ductility in nanocrystalline and ultrafine grained metals. *Scripta Materialia*, 49 (7), 657–662. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(03\)00394-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00394-4)

25. Nerubatskyi, V. P., Vovk, R. V., Gevorkyan, E. S., Hordiienko, D. A., Nazyrov, Z. F., & Komarova, H. L. (2023). Investigation of phase and structural states in nanocrystalline powders based on zirconium dioxide. *Low Temperature Physics*, 49 (11), 1277–1282. <https://doi.org/10.1063/10.0021374>

26. Gevorkyan, E., Nerubatskyi, V., Chyshkala, V., & Morozova, O. (2021). Revealing specific features of structure formation in composites based on nanopowders of synthesized zirconium dioxide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (12(113)), 6–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242503>

27. Hevorkian, E. S., Nerubatskyi, V. P., Rucki, M., Kilikevicius, A., Mamalis, A. G., Samociuk, W., & Morozow, D. (2024). Electroconsolidation method for fabrication of fine-dispersed high-density ceramics. *Nanotechnology Perceptions*, 20 (1), 100–113. <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v20i1.363>

28. Krzysiak, Z., Gevorkyan, E., Nerubatskyi, V., Rucki, M., Chyshkala, V., Caban, J., & Mazur, T. (2022). Peculiarities of the phase formation during electroconsolidation of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2\text{--ZrO}_2$ powders mixtures. *Materials*, 15 (17), 6073. <https://doi.org/10.3390/ma15176073>

29. Hevorkian, E. S., Nerubatskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Lytovchenko, S. V., Prokopiv, M. M., Samociuk, W., & Mechnik, V. A. (2024). Technological and innovative features of the electroconsolidation method as a kind of plasma sintering for refractory compounds. *Journal of Superhard Materials*, 46 (5), 364–375. <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>

30. Tyagi, B., Sidhpuria, K., Shaik, B., & Vir Jasra, R. (2006). Synthesis of nanocrystalline zirconia using sol–gel and precipitation techniques. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45 (25), 8643–8650. <https://doi.org/10.1021/ie060519p>

31. Chang, Y., Wang, C., Liang, T., Zhao, C., Luo, X., Guo, T., Gong, J., & Wu, H. (2015). Sol–gel synthesis of mesoporous spherical zirconia. *RSC Advances*, 5, 104629. <https://doi.org/10.1039/c5ra23782c>

32. Liu, L., Wang, S., Zhang, B., Jiang, G., Yang, J., Li, Y., Liu, W., Wang, J., & Kong, W. (2022). From modification to mechanism: Supercritical hydrothermal synthesis of nano-zirconia. *Ceramics International*, 48 (4), 4401–4423. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.028>

33. Garanin, Y., Shakirzyanov, R., Borgekov, D., Kozlovskiy, A., Volodina, N., Shlimas, D., & Zdorovets, M. (2024). Study of morphology, phase composition, optical properties, and thermal stability of hydrothermal zirconium dioxide synthesized at low temperatures. *Scientific Reports*, 14, 29398. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80399-x>

34. Seisenbaeva, G. A., Dudarko, O. A., & Kessler, V. G. (2019). Hierarchically porous zirconia through precursor-directed large-scale synthesis. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 90, 140–148. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4836-2>

35. Fariñas, J. C. (2025). Microwave-assisted hydrothermal synthesis of nanocrystalline zirconia Síntesis hidrotermal asistida por microondas de circonia nanocristalina. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 64 (4), 100445. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2025.100445>

36. Biswas, M., Ojha, P. K., & Prasad, C. D. (2011). Synthesis of nanocrystalline yttria stabilized zirconia for SOFC. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 1. <https://doi.org/10.5772/50961>
37. Tahmasebpour, M., Babaluo, A. A., & Razavi Aghjeh, M. K. (2008). Synthesis of zirconia nanopowders from various zirconium salts via polyacrylamide gel method. *Journal of the European Ceramic Society*, 28 (4), 773–778. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.09.018>
38. Yang, C., Jin, Z., Chen, X., Fan, J., Qiu, M., Fu, K., & Fan, Y. (2021). Modified wet chemical method synthesis of nano-ZrO₂ and its application in preparing membranes. *Ceramics International*, 47 (10(A)), 13432–13439. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.201>
39. Bumajdad, A., Nazeer, A. A., Al Sagheer, F., Nahar, S., & Zaki, M. I. (2018). Controlled synthesis of ZrO₂ nanoparticles with tailored size, morphology and crystal phases via organic/inorganic hybrid films. *Scientific Reports*, 8, 3695. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22088-0>
40. Stolzenburg, P., Freytag, A., Bigall, N. C., & Garnweitner, G. (2016). Fractal growth of ZrO₂ nanoparticles induced by synthesis conditions. *CrystEngComm*, 18, 8396–8405. <https://doi.org/10.1039/C6CE01916A>
41. Foo, Y. T., Abdullah, A. Z., Horri, B. A., & Salamatina, B. (2019). Optimised co-precipitation synthesis condition for oxalate-derived zirconia nanoparticles. *Ceramics International*, 45 (17(B)), 22930–22939. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.336>
42. Piticescu, R., Monty, C., & Millers, D. (2005). Hydrothermal synthesis of nanostructured zirconia materials: Present state and future prospects. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 109 (1), 102–106. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.03.092>
43. Alresheedi, F. (2025). Hydrothermal sol–gel synthesis of zirconium dioxide (ZrO₂) nanoparticles for enhanced degradation of Congo Red. *Results in Physics*, 79, 108521. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2025.108521>
44. Li, Q., Wang, Z., & Wang, X. (2023). CFD–PBM simulation for continuous hydrothermal flow synthesis of zirconia nanoparticles in a confined impinging jet reactor. *Materials*, 16 (9), 3421. <https://doi.org/10.3390/ma16093421>
45. Itagaki, Y., Takemoto, M., Murata, H., Kanzawa, T., Tokudome, Y., & Nakahira, A. (2022). Supercritical hydrothermal synthesis of zirconia nanoparticles from zirconium basic carbonate. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 130 (11), 861–866. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.22083>
46. Liu, S., Wang, J., Chen, Y., Song, Z., Han, B., Wu, H., Zhang, T., & Liu, M. (2023). Tetragonal nanosized zirconia: Hydrothermal synthesis and its performance as a promising ceramic reinforcement. *Inorganics*, 11 (5), 217. <https://doi.org/10.3390/inorganics11050217>
47. Pyda, W., Haberko, K., & Bułko, M. M. (1991). Hydrothermal crystallization of zirconia and zirconia solid solutions. *The American Ceramic Society*, 74 (10), 2622–2629. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1991.tb06810.x>
48. Dell'Agli, G., Mascolo, G., Mascolo, M. C., & Pagliuca, C. (2006). Weakly-agglomerated nanocrystalline (ZrO₂)_{0.9}(Yb₂O₃)_{0.1} powders hydrothermally synthesized at low temperature. *Solid State Sciences*, 8 (9), 1046–1050. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2006.03.009>
49. Zhang, Y.-W., Sun, X., Xu, G., Tian, S.-J., Liao, C.-S., & Yan, C.-H. (2003). Co-doping effects of Y³⁺ and Sc³⁺ on the crystal structures, nanoparticle properties and electrical behavior of ZrO₂ solid solutions prepared by a mild urea-based hydrothermal method. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 5 (10), 2129–2134. <https://doi.org/10.1039/b301074k>
50. Dudnik, E. V., Shevchenko, A. V., Ruban, A. K., Red'ko, V. P., & Lopato, L. M. (2010). Effect of Al₂O₃ on the properties of nanocrystalline ZrO₂ + 3 mol % Y₂O₃ powder. *Inorganic Materials*, 46, 172–176. <https://doi.org/10.1134/S0020168510020159>
51. Garg, N., Mittal, V. K., Bera, S., Dasgupta, A., & Sankaralingam, V. (2012). Preparation and characterization of tetragonal dominant nanocrystalline ZrO₂ obtained via direct precipitation.

Ceramics International, 38 (3), 2507–2512. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.11.020>

52. Mamalis, A., Hevorkian, E., Nerubatskyi, V., Krzysiak, Z., Morozova, O., & Chalko, L. (2023). Peculiarities of obtaining nanostructured materials compacted by the method of hot pressing due to the passage of direct electric current. Book of Abstracts of the of the 12th Japanese-Mediterranean Workshop Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (JAPMED'12) (Batumi, Ajara Autonomous Republic, Batumi Shota Rustaveli State University, July 17–20, 2023). 66–67.

53. Gevorkyan, E., Morozova, O., Chyshkala, V., & Nerubatskyi, V. (2023). Nanostructured materials compacted via hot pressing method by direct current transmission. Book of Abstracts of the 8th International Materials Science Conference HighMatTech-2023 (Kyiv, October 2–6, 2023). 38.

54. Hevorkian, E., Samociuk, W., Rucki, M., Krzysiak, Z., Pieniak, D., Nerubatskyi, V., Chyshkala, V., Lytovchenko, S., Chalko, L., Morozow, D., Caban, J., & Kulich, V. (2025). Microstructure and properties of binderless μ WC obtained using the electroconsolidation method. *Materials*, 18 (20), 4646. <https://doi.org/10.3390/ma18204646>

55. Hevorkian, E., Michalczewski, R., Rucki, M., Sofronov, D., Osuch-Słomka, E., Nerubatskyi, V., Krzysiak, Z., & Latosińska, J. N. (2024). Effect of the sintering parameters on the structure and mechanical properties of zirconia-based ceramics. *Ceramics International*, 50 (19(A)), 35226–35235. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.06.331>

56. Kocjan, A., Logar, M., & Shen, Z. (2017). The agglomeration, coalescence and sliding of nanoparticles, leading to the rapid sintering of zirconia nanoceramics. *Scientific Reports*, 7, 2541. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02760-7>

57. Fan, J., Liu, D., Zhao, K., Liu, J., & An, L. (2023). Densification kinetics and mechanism of zirconia ceramics via hot oscillating pressing. *Open Ceramics*, 13, 100323. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100323>

Геворкян Едвін Спартаківич, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Hevorkian Edvin Spartakovych, Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Wagon Engineering and Product Quality Department, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, Candidate of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics Department, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID ID: 0000-0002-4309-601X.

Дата надходження статті: 20.06.2026 р.

Дата прийняття статті до друку: 04.09.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY