

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертацію **Бородянської Ганни Юліївни** «Особливості консолідації, формування структури і властивостей керамічних матеріалів у процесах іскро-плазмового спікання» поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство, технічні науки (13 Механічна інженерія)

З вивчення дисертації та автореферату й ознайомлення з опублікованими роботами здобувача за темою дисертації дозволили відзначити наступне:

### **Актуальність теми дисертації.**

Протягом останніх двох десятиліть значні зусилля направлені на розробку нових методів спікання для повного ущільнення об'ємних наноструктурних керамік. Надзвичайний інтерес викликають розробки нових технологій отримання наноструктурних матеріалів у консолідованому вигляді, що базуються як на досвіді використання відомих рішень, так і на накопиченні більш глибоких знань про структуру, механізми перетворень та взаємодії наноматеріалів із зовнішнім середовищем. Наноструктурні матеріали поступово замінюють традиційні за рахунок унікальності своєї структури, яка дозволяє одержувати нові перспективні властивості. Зменшення розміру зерен полікристалічного матеріалу в багатьох випадках призводить до значного збільшення міцності й твердості. Експериментальні дані підтверджують збільшення твердості нанокристалічних матеріалів більш ніж у 2 рази, а міцності в 1,5–3 рази при кімнатній температурі. З іншого боку, ті матеріали, які зазвичай мають високий модуль пружності, але дуже крихкі (інтерметаліди та кераміка), за наявності нанокристалічної структури демонструють збільшення пластичності, а це дозволяє застосовувати до них технології обробки тиском та одержувати керамічні деталі складної форми. Для об'ємної нанокераміки та нанокристалічних композитів визначено багато можливостей їх впровадження в якості, наприклад, керамічних частин двигунів внутрішнього згорання, фільтрів, деталей паливних елементів тощо.

**Актуальність даної роботи** полягає в розвитку сучасного перспективного методу іскро-плазмового спікання, необхідного для створення нових щільних наноструктурних керамічних матеріалів та композитів із покращеними структурно-чутливими властивостями шляхом встановлення закономірностей ПС-ущільнення, росту зерен та

фазоутворення залежно від умов консолідації (температури, тиску, величини електричного поля)

Дисертація відповідає основним науковим напрямам роботи Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України і є узагальненням наукових результатів, отриманих автором при виконанні планових, держбюджетних і цільових тем, а також програм Державного фонду фундаментальних досліджень (ДФФД) і міжнародних грантів, у яких автор була запрошеним дослідником, відповідальним виконавцем та співкерівником розділів: цільова тема 0112U002297 «Розробка наноконпозиційних матеріалів на основі порошків в системі Ti–Zr–Al–B–N з застосуванням електророзрядного, мікрохвильового реакційного спікання в середовищі атомарного водню» (2012–2016 pp.); програмно-цільові тематики НАН України: 0110U005588 «Фундаментальні проблеми наноструктурних систем, наноматеріалів, нанотехнологій» та «Основи нових методів консолідації об'ємних наноструктурних матеріалів» (2010–2014 pp.) і 0115U001458 «Фундаментальні проблеми створення нових наноматеріалів і нанотехнологій» та «Консолідація наноструктурної кераміки і наноконполітів з розміром зерна менше за 50 нм та вивчення розмірної залежності їх властивостей» (2015–2019 pp.). Дані дисертаційної роботи також були отримані при виконання міжнародних проектів та програм: програми Міністерства освіти, культури, спорту, науки та технологій Японії «Special coordination funds of the Science and Technology Agency of Japan “Design and Fabrication of Frontier Ceramics» (2002– 2005 pp.) та «Innovative materials processing by controlling chemical reaction fields» (2005–2010 pp.); Спеціальний грант Національного інституту матеріалознавства «Fabrication of advanced ceramics by colloidal processing and external energy stimulation» (Японія, 2006–2011 pp.); гранти Nanyang Technological University (Temasek Labs, NTU, Сінгапур) «Materials Synthesis and Sintering via SPS Technique» (Сінгапур, 2010–2013 pp.) та «Light-weight B<sub>4</sub>C/BN based superhard and highly shock-energy dissipative nanocomposites via nanoreactors engineering & spark plasma (SPS) synthesis/consolidation» (2014–2016 pp.); грант «KAKENHI-B Grant-in-Aid for Scientific Research – B» Японського товариства промоції науки ((JSPS), Національний інститут матеріалознавства, Японія) «Creation of boride-based ultra-high temperature ceramics with innovative properties» (2015–2017 pp.).

### **Загальна характеристика роботи**

Виконано аналіз дисертації, що являє собою наукову роботу, яка виконана у вигляді рукопису та складається зі вступу, восьми розділів,

загальних висновків. Робота містить 323 сторінки, 126 рисунків, 19 таблиць, список з 431 використаних літературних джерел і 4 додатків. Автореферат повною мірою відображає зміст дисертації.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, розкрито суть і стан наукової проблеми, мету і задачі досліджень, наукову новизну, практичну цінність, обґрунтовано достовірність отриманих наукових результатів та наведені дані про публікації й апробацію роботи.

У **першому розділі** роботи здійснено аналіз сучасного стану розвитку надшвидкої консолідації порошків та розглянуті потенційні переваги ІПС-технології, а саме отримання виключно дрібнозернистої щільної мікроструктури, з фактичним збереженням розмірів вихідного порошку в спеченому виробі завдяки короткостроковості циклу спікання. Визначена, необхідність виконання прецизійного контролю усіх вихідних параметрів і забезпечення складної системи управління під час ІПС. В дисертаційній роботі відображено дослідження особливостей ІПС-консолідації наноструктурних керамічних матеріалів із різними типом провідності та природою хімічного зв'язку, а саме оксидів, нітридів, карбідів та їхніх композитів. Розглянуто метод спікання в режимі теплового пробою «спалахом» (*Flash sintering*) та зроблено припущення про можливість використання методу ІПС в режимі теплового пробою. Проведений аналіз підтвердив актуальність теми і дав змогу автору визначити мету і обґрунтувати основні задачі досліджень дисертаційної роботи.

У **другому розділі** описано розроблену методику ІПС-консолідації нанодисперсних оксидних порошків з киснево-іонним типом провідності (діоксиду цирконію, легованого оксидом ітрію, та оксиду церію, легованого оксидом гадолінію). Методика дозволила отримати безпористі кераміки із нанорозмірним зерном при критично низьких температурах. Вперше на прикладі кубічного 8YSZ та CGO доведено можливість прецизійного контролю гомогенності структури в умовах низькотемпературного ІПС та отримана нанокераміка в системі 8YSZ  $\sim 73$  нм, та CGO з зерном від  $\sim 32$  до  $\sim 18$  нм. Розроблено та застосовано схему прикладання високого тиску до 150 МПа, що понизило температуру ІПС до 1000 °С.

У **третьому розділі** виконано дослідження методики консолідації нанопорошку в режимі теплового пробою «спалахом» (*flash sintering*). Розроблено та апробовано методику консолідації нанопорошку спалахом, яка дозволяє практично уникнути росту зерна і завдяки високій локалізації процесу нагрівання та короткому часу обробки забезпечити унікальні умови для надшвидкого ущільнення зразків. Доведено можливість використання

методу ІПС в режимі теплового пробою «спалахом» (швидкість нагрівання –  $\sim 300$  °C/c) для консолідації нанопорошку 3Y–TZP. Проведені дослідження процесів консолідації та еволюції мікроструктури нанодисперсного 3Y–TZP порошку, що мав розміри агломератів близько 60 нм, а первинних кристалітів  $\sim 9$  нм, причому як у режимі «традиційного» ІПС (із використанням графітової матриці з пуансонами), так і ІПС у режимі теплового пробою «спалаху» (в умовах надзвичайно високошвидкісного нагрівання).

**Четвертий розділ** присвячено унікальній методиці одностадійного синтезу та консолідації в умовах реакційного ІПС багатокатіонних оксидів  $\text{La}_{1-a}\text{Sr}_a\text{Ga}_{1-b}\text{Mg}_b\text{O}_{3-x}$  (LSGM). Розроблена методика включає створення нанореакторів проміжних продуктів синтезу та їх подальшу реакційну декомпозицію в умовах ІПС з одночасним ущільненням продуктів синтезу. Це дозволило одночасно синтезувати надзвичайно гомогенний п'яти-катіонний оксид з розміром кристалітів  $\sim 11$  нм та відразу-ж ущільнити його до 100% густини при збереженні зерна на рівні  $\sim 14$  нм. Отримання щільного складного оксиду з таким аномально низьким розміром зерна дало змогу показати можливість зміни його фізичних властивостей.

У **п'ятому розділі** доведено можливість застосування іскро-плазмового спікання для отримання об'ємних нанокомпозитів  $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  та  $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}-\text{AlN}$ . Показано, що реакційно консолідований нанокомпозит  $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  має твердість 17,53 ГПа і тріщиностійкість  $\sim 9$  МПа $\cdot$ м<sup>1/2</sup> – вдвічі вищу за тріщиностійкість нітриду титану і втричі, ніж у нітриду алюмінію. Результатом аналізу особливостей консолідації, складу та структури ІПС-консолідованих нанокомпозитів  $\text{TiN}-\text{AlN}$ , стало отримання об'ємної кераміки з кубічною матрицею складу  $\text{Ti}_{0,82}\text{Al}_{0,18}\text{N}$ , армованою нананокристаллами гексагонального нітриду алюмінію, що продемонструвала твердість за Віккерсом 24–29 ГПа.

**Шостий розділ** присвячено розробленій методиці реакційного ІПС композитів  $\text{B}_a\text{C}_b-(\text{B}_x\text{O}_y/\text{BN})$  із ламелярною наноструктурною  $\text{B}_x\text{O}_y/\text{BN}$  3D-сіткою границь зерен. Автором доведено, що 3D-сітка  $\text{B}_x\text{O}_y/\text{BN}$  є результатом реакцій  $\text{N}_2$  із вихідним порошком карбіду бору в системі  $\text{B}_4\text{C}/\text{B}_2\text{O}_3-\text{N}_2$ , активованих прямим проходженням електричного струму в процесі ІПС. Проаналізовано структурно-чутливі механічні властивості отриманих композитів.

У **сьомому розділі** проаналізовано комплексний взаємозв'язок між умовами ІПС, механізмами консолідації, особливостями кераміки на основі карбіду бору та її статичними і динамічними властивостями. Доведено можливість управління динамічною в'язкістю руйнування кераміки. Показано п'яти-разове покращення динамічної в'язкості руйнування об'ємної

кераміки з  $\sim 6$  до  $\sim 30$  МДж/м<sup>2</sup>, що дозволяє запропонувати їх подальше використання в якості елементів цілої низки конструкцій, і в т.ч. захисних.

**Восьмий розділ** присвячено реакційному ІПС нанокмползів  $B_aC_b-$  ( $B_xO_y/BN$ ), з вторинними фазами системи Si–B–C(O, N), і продемонстрували міцність на вигин до 800 МПа в інтервалі температур від 25 до 1600 °С. Масштабування розробленої методики реакційного ІПС композитів на основі карбіду бору дозволило отримувати 100x100x20 мм керамічних пластин із кращим порівняно з усіма існуючими кераміками одночасним співвідношенням твердості, тріщиностійкості, міцності на вигин і динамічної в'язкості руйнування до питомої ваги кераміки.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі.**

Обґрунтованість положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Бородяньскої Ганни Юліївни базується на аналізі літературних джерел за даною проблемою, гармонійній постановці мети і задач дослідження, забезпечується застосуванням цілого ряду сучасних взаємодоповнюючих методів досліджень, відтворюваністю результатів, їх взаємоузгодженістю і відповідністю до відомих з літератури даних вітчизняних і іноземних вчених. Про достовірність наукових положень свідчить також значний обсяг експериментальних результатів, одержаних здобувачем, використання методів моделювання для отримання результатів.

### **Достовірність результатів досліджень.**

Залучення комплексних методів фізико-хімічного аналізу і сучасних приладів та устаткування для досліджень композиційних матеріалів, у тому числі виконаних у спеціалізованих лабораторіях в рамках науково-технічного співдружності, забезпечують достовірність результатів досліджень.

Використано іскро-плазмове спікання (ІПС), спікання в режимі теплового пробою «спалахом» (*flash*), ІПС у режимі теплового пробою «спалаху» (*flash-SPS*), ІПС із надвисоким тиском (до 1 ГПа), метод створення багатокатіонних нанореакторів, метод електростатичного розпилення (атомізації), термогравіметрія та диференційний термічний аналіз (TG–DTA), диференційна скануюча калориметрія (DSC), рентгеноструктурний та рентгенофазовий аналізи, локальний рентгеноспектральний аналіз (SEM- та TEM-EDS), просвічуюча та скануюча електронна мікроскопі високої прецизійності, аналіз 3D-сітки міжзеренних границь трансмісійною просвічуючою мікроскопією надвисокої роздільної здатності, лазерна гранулометрія (DLS), метод Раманівської спектроскопії, тепла десорбція азоту, визначення постійного струму намагнічування нанокераміки,

фрактографічний та локальний хімічний аналіз, а також методи вивчення механічних властивостей кераміки: твердості, тріщиностійкості, наноіндентування, аналізу динамічних характеристик кераміки (*Split Hopkinson Pressure Bar Test*) та визначення міцності керамік на вигин у температурному діапазоні 25–2000 °С. Застосування ж комплексу незалежних експериментальних та аналітичних методів, що взаємно доповнюють один одного, забезпечило повну достовірність результатів роботи. Результати досліджень впроваджено навчальний процес на спеціалізованій кафедрі НТТУ «КП» та успішно використані під час апробації.

**До основних наукових результатів дисертації слід віднести наступне:**

1. Вперше в умовах низькотемпературного ІПС до 1000 С на прикладі кубічного діоксиду цирконію 8YSZ та оксиду церію-гадолінію CGO показано можливість прецизійного контролю гомогенності та розміру нанозерна від 90 до ~73 нм у системі 8YSZ і від 32 до 18 нм у системі CGO, відповідно.
2. Вперше розроблено методику ІПС у режимі теплового пробою «спалахом» нанодисперсного порошку частково стабілізованого тетрагонального діоксиду цирконію в режимі термопробою, який відрізняється від «традиційного» ІПС надвисокими швидкостями нагрівання і масоперенесення та дозволяє фактично уникнути росту зерна. Швидкість же внутрішньоагрегатного та міжагрегатного ущільнень є однаковою, тож відбувається квазіодностадійна швидкісна консолідація.
3. Вперше розроблено та експериментально реалізовано метод одностадійного реакційного синтезу в нанореакторах, кальцинації та ІПС-консолідації гомогенних багатокатіонних оксидів  $(La_{0,8}Sr_{0,2})(Ga_{0,9}Mg_{0,1})O_{3-\delta}$  (LSGM) та LSGM (із 2% (мас.) CeO). Нанокераміка LSGM та LSGM-Ce з середніми розмірами зерна 11 та 14 нм відповідно, що отримана в режимі низькотемпературного ІПС (1250 °С), показала високу магніторезистивність у діапазоні температур 5–285 К.
4. Вперше методом ІПС у системі Ti–Al–N отримано об'ємні наноккомпозити, які за рахунок наноструктури показали твердість 17,53 ГПа і тріщиностійкість 9 МПа·м<sup>1/2</sup>, що вдвічі вище за тріщиностійкість нітриду титану (TiN) і втричі перевищує тріщиностійкість нітриду алюмінію (AlN). Внаслідок реакційного ІПС при температурах вище

1500 °C було отримано наноккомпозит TiN/AlN, що мав кубічну матрицю складу  $Ti_{0,82}Al_{0,18}N$ , армовану нанокристаллами гексагонального нітриду алюмінію, який показав твердість за Віккерсом 24–29 ГПа.

5. Створено методику реакційного ІПС в потоці азоту унікальних композитів  $B_aC_b-(B_xO_y/BN)$  з ламелярною наноструктурною  $B_xO_y/BN$  3D сіткою з рекордними механічними властивостями, зокрема композит  $B_4C - (B_xO_y/BN)$  з  $\sim 0.4$  мас.% BN показав максимальну твердість  $\sim 49$  ГПа. Наноструктура композитів  $B_aC_b-(B_xO_y/BN)$  утворюється під час реакційного ІПС, а саме зменшується розмір кристалітів (зерен) карбіду бору ( $B_4C$ ), утворюється безперервна 3D сітка границь зерен, що фактично є ламелярними шарами турбостратного нітриду бору (t-BN) та пронизуючого/заміщаючого його субоксиду бору ( $B_xO_y$ ), змінюється співвідношення бору до вуглецю в самих зернах карбіду бору (утворюється  $B_{13}C_2$ ), за рахунок чого і відбувається значне покращення механічних характеристик композиту.
6. Вперше сформульовано принципи створення наноккомпозитів на основі  $B_4C$  кераміки. За міжнародним стандартом SHPB проаналізовано комплексний взаємозв'язок між умовами реакційного ІПС, особливостями структури і можливістю управління динамічною міцністю кераміки за міжнародним стандартом SHPB. Легка  $B_4C$  кераміка з ламелярною наноструктурною  $B_xO_y/BN$  3D сіткою границь зерен продемонструвала покращення динамічної в'язкості руйнування в п'ять разів з 6 до 30 МДж/м<sup>2</sup> та тріщиностійкості з 2,2–4,0 до 5,0–7,5 МПа м<sup>1/2</sup>.
7. Масштабування розробленої методики реакційного ІПС композитів на основі карбіду бору дозволило отримати стандартні пластини з розмірами 100 мм у діаметрі та висотою 20 мм, з найкращим одночасним співвідношенням твердості, тріщиностійкості, міцності на вигин та динамічної міцності до питомої ваги кераміки. Створений новий клас керамік за вказаним комплексом властивостей з урахуванням його питомої ваги (сумарної ваги готового виробу) є кращим порівняно з усіма розробленими до цього часу керамічними композиційними матеріалами.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

Досягнення, які висвітлені в дисертації, вже зараз мають практичну цінність. Так, практичне значення має розроблена методика низькотемпературної одностадійної ІПС-консолідації багатокатіонних оксидних керамік із надзвичайно дрібним (10–20 нм) зерном.

Завдяки відмінній спорідненості з кістковими тканинами (остеоінтегрованості) та відсутності у діоксиді цирконію онкогенного ефекту консолідовані ІПС діоксид-цирконієві наноструктурні керамічні прототипи (з розміром зерна 20 нм) запропоновані для тестування і як імплантати, і як кандидати до використання при ендопротезуванні суглобів. А, в свою чергу, оксид церію та LSGM із розміром зерна 15 нм вже тестуються в якості матричного матеріалу для виготовлення наносенсорів.

Практичне значення має також розроблена методика консолідації нанодисперсних керамічних порошків ІПС у режимі теплового пробою «спалахом», який фактично дозволяє уникнути росту зерна, а завдяки 2–10-хвилинному повному циклу консолідації в перспективі дасть до 90% економії електроенергії порівняно з будь-яким іншим існуючим методом консолідації керамічних виробів.

Крім того, розроблена методика реакційної ІПС- консолідації нанокompозитів на основі TiN/AlN та композитів на основі  $B_4C$  дозволила отримати об'ємний армований нанокompозит  $Ti_{0,82}Al_{0,18}N$  із твердістю  $\sim 29$  ГПа, а також композит  $B_aC_b-(B_xO_y/BN)$  із ламелярною наноструктурною  $B_xO_y/BN$ -3d-сіткою з рекордною твердістю до 49 ГПа.

Ці композити вже тестуються як матеріали-кандидати при виготовленні деталей реакторів керованого термоядерного синтезу та нових ядерних реакторів, де паливом є нітрид урану. Надзвичайно перспективними є й розроблені при підготовці дисертаційної роботи нанокompозити  $B_aC_b-(B_xO_y/BN)$  з міцністю на вигин 800 МПа в інтервалі температур від 25 до 1600 °С. Практичне значення має також методика управління динамічною в'язкістю руйнування кераміки на основі карбіду бору. Так, збільшення динамічної в'язкості руйнування легких композитів на його основі в п'ять разів – із 6 до 30 МДж/м<sup>2</sup> – дозволяє їх подальше використання в якості елементів систем легкого бронювання.

Викладені в дисертаційній роботі результати досліджень включено до університетських курсів лекцій «Введення в нанокompозити і нанотехнології» та «Основи нанотехнологій», які на сьогодні викладаються в НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а курс із чотирьох лекцій «Нові нанокompозити методом іскро-плазмового спікання» – в Школі матеріалознавства та інженерії Наньянського Технологічного університету (SMSE NTU) Сінгапура. Масштабування розробленої методики реакційного ІПС композитів на основі карбіду бору дозволило отримати керамічні пластини з одночасним найкращим серед відомих на сьогодні співвідношенням твердості, тріщиностійкості, міцності на вигин і динамічної міцності та питомої ваги кераміки. Це дає змогу планувати практичне



застосування створеного нового класу кераміки з рекордним комплексом властивостей – що підтверджується результатами тестування властивостей пластин  $B_aC_b-(B_xO_y/BN)-nB$ , отриманих автором роботи в «High Speed Dynamic Laboratory» (TL NTU), Сінгапур.

Проведено порівняльні тести пластини  $B_aC_b-(B_xO_y/BN)-nB$  із розмірами 100x100x20 мм та комерційних пластин компанії «CeramTech» (США). З порівняльної таблиці (Акта випробувань) механічних властивостей захисних пластин на основі карбіду кремнію «Sicadur» та карбіду бору «Bocadur» (США) з нашими пластинами складу  $B_aC_b-(B_xO_y/BN)-nB$ , отриманими реакційним ІПС, видно, що при тріщиностійкості 4–5 МПа·м<sup>1/2</sup> розроблені пластини мають значно вищу твердість та міцність на вигин, які на 60–90% перевищують міцність кращих комерційних пластин тих самих розмірів.

Проаналізовано й динамічні властивості пластин  $B_aC_b-(B_xO_y/BN)-nB$ . В актах їх випробувань показано, що пластини діаметром 80 мм із композитів на основі  $B_4C$  демонструють масову ефективність  $E_m$ , яка дорівнює 3,9 і 4,7 – високий результат для швидкості ударника, більшої за 1400 м/с, порівняно з найкращою комерційною пластиною «ESF F-plus» (SiC), чия  $E_m$  становить 5,05 при тих самих швидкості та масі ударника й товщині пластини 20 мм. Також аналізовано відтворюваність властивостей керамічних пластин однакової композиції, отриманих в однакових умовах ІПС, і доведено, що їхні товщина пластин, густина та  $E_m$  практично ідентичні. За результатами динамічного тестування (DOP) пластин діаметром 100 мм композитів  $B_4C-TiB_2-B$ :  $E_m$  композитних пластин діаметром 100 мм та товщиною 15 мм становить від 3,17 до 3,65 (залежно від співвідношення  $B_4C$  та  $TiB_2$ ).

#### **Повнота викладення результатів роботи у наукових працях.**

Наукові праці, які опубліковано за темою дисертації, містять основні наукові положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень, висновки та рекомендації. Матеріали дисертації Бородяньської Ганни Юліївни опубліковані в 55 наукових працях, із них 37 статей – у провідних наукових фахових виданнях, що входять до міжнародного індексу цитованості *International Citation Index (ICI)*, мають унікальний цифровий ідентифікатор **doi** та цитуються всіма міжнародними наукометричними базами (SCOPUS, Web of Science компанії «Thomson Reuters» та низка ін.), 18 публікацій за матеріалами доповідей на міжнародних конференціях. Зокрема, згідно даними SCOPUS та Web of Science, особистий індекс цитованості Хірша (*h-index*) автора становить 13.

Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації.

### **Зауваження до дисертаційної роботи.**

У дисертаційній роботі на мій погляд є наступні недоліки та запитання

1. Не зовсім ясно яким чином готувалися вихідні суміші з нанопрошків, як здійснювали змішування вихідних порошків для отримання однорідної суміші?
2. Чи існує різниця між механізмом спікання порошків які проводять і не проводять електричний струм, яким чином впливають перколяційні ефекти на процеси спікання?
3. Не зрозуміло яким чином здійснювалася оптимізація складів порошків та режимів спікання?
4. Було би краще якщо би наводились якісь реологічні моделі процесів спікання.
5. Не зрозуміло як впливає на властивості трансформаційний ефект при спіканні частково стабілізованого оксиду цирконію.
6. Було б цікаво побачити деякі порівняльні експлуатаційні властивості розроблених матеріалів.
7. Чомусь немає патентів на розроблені композиційні матеріали.
8. Кількість поставлених завдань і зроблені висновки трохи не збігаються, є неточності в нумерації поставлених завдань.
9. Типова діаграма рис.1.5 на сторінці 64 не зовсім зрозуміла, оскільки немає пояснення цифрам на діаграмі, на стр.74 дається посилання на рис.1.9, хоча це має бути малюнок 1.8.,на стр.168 на рис.3.4, але треба рис.4.4, посилання на рис.7.3 на стр.260 є некоректним.
- 10.Треба уточнити на сторінці 193 вага засипки в графітову матрицю діаметром 10 мм, 0,5 г здається дуже мало для попереднього пресування.

Однак це зауваження ні як не впливають на наукову та практичну значущість та високий рівень даною дисертаційній роботі.

### **ВИСНОВОК**

Дисертаційна робота роботу Бородяньскої Ганни Юліївни «Особливості консолідації, формування структури і властивостей керамічних матеріалів у процесах іскро-плазмового спікання» є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує науково-прикладну проблему у матеріалознавстві, суть якої полягає в розробці наукових та практичних основ консолідації, формування структури і властивостей керамічних матеріалів у процесах іскро-плазмового спікання

Дисертаційна робота викладена грамотною технічною мовою, є логічною та переконливою. За актуальністю, науковою новизною отриманих результатів, їх достовірністю та практичною значимістю дисертаційна робота задовольняє вимогам п.п. 9, 11,12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 щодо докторських дисертацій, а її автор – Бородянська Ганна Юліївна, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство (13 Механічна інженерія).

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри «Якість, стандартизація,  
сертифікація та технологія виготовлення  
матеріалів»

Українського державного  
університету залізничного транспорту



Е. С. Геворкян



Особистий підпис  
засвідчую \_\_\_\_\_ 20 \_\_ р.  
Завідуючий канцелярією  
УкрДУЗТ

Геворкян Е.С.

