

## **ВІДГУК**

офіційного опонента **Пріхні Тетяни Олексіївни**  
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

### **Актуальність теми дисертації**

Вирішення науково-технічної проблеми ефективності ущільнення, вивчення закономірностей утворення щільних керамічних матеріалів, формування функціональних властивостей матеріалів є головним напрямком представленої дисертаційної роботи. Саме розробка нових технологій отримання наноструктурних матеріалів у консолідованому вигляді, що базуються на можливості прецизійного контролю густини, розміру зерна та якості границь зерен під час іскро-плазмового спікання (ІПС) викликають надзвичайний інтерес. Можливість використання ІПС у режимах гарячого пресування (до 100 °С за хвилину), електророзрядного спікання (100?1000 °С/хв), в режимі теплового пробою «спалахом» ( $\geq 1000$  °С/хв), проведення реакційного спікання дозволяє вирішувати різні завдання зі структуроутворення та досягнення багатофункціональності матеріалів. Широке використання ІПС-консолідації керамічних нанокompatитів з різним типом провідності, таких що здатні проводити струм (наприклад, нітридів), та матеріалів, в яких треба створювати особливі умови для проходження струму (таких, як оксиди та бориди) є однією з особливостей даної дисертаційної роботи. Впровадження нових підходів до консолідації нанокераміки, на основі методів контролю швидкості ущільнення, в комплексі з використанням сучасного промислового устаткування, масштабування розробленої методики реакційного ІПС композитів на основі карбіду бору дозволяють прогнозувати швидке впровадження і випуск виробів на основі нанокompatитів різного функціонального призначення. Тому тема дисертації є актуальною і її результати мають важливе практичне значення.

Дисертація відповідає основним науковим напрямкам 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 наноконструкційних 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 наноконструкцій 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.).

### **Оцінка наукової новизни, висновків і рекомендацій**

У роботі вирішена науково-практична проблема створення щільної наноструктурної кераміки з різними типом провідності і природою хімічного зв'язку, а також керування її структурою та структурно-обґрунтованими конструкційними властивостями шляхом використання потужного методу іскро-плазмового спікання як попередньо синтезованих нанопорошків, так і нанодисперсних продуктів хімічних реакцій, що супроводжують це спікання. Автором отримано наступні нові наукові результати:

- Вперше в умовах низькотемпературного ПС 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.

- 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.

- 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 °C), показала високу магніторезистивність у діапазоні температур 5–285 К.

- Вперше методом ІПС у системі Ti–Al–N отримано об'ємні нанокompозити, 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 нанокompозит TiN/AlN, що мав кубічну матрицю складу  $Ti_{0,82}Al_{0,18}N$ , армовану нананокристаллами гексагонального нітриду алюмінію, який показав твердість за Віккерсом 24–29 ГПа.

- 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 ~ 0.4 мас.% BN показав максимальну твердість ~ 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.

- Вперше сформульовано принципи створення нанокompозитів 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  $\sim 6$  до  $\sim 30$  МДж/м<sup>2</sup> та тріщиностійкості з 2,2–4,0 до 5,0–7,5 МПа.м<sup>1/2</sup>.

- Масштабування розробленої методики реакційного ІПС композитів на основі карбиду 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 в'язкості руйнування 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.

### **Оцінка достовірності та обґрунтування основних положень дисертації**

Достовірність отриманих результатів досліджень забезпечена застосуванням експериментальних, розрахункових та аналітичних взаємодоповнюючих методів: створення багатокатіонних нанореакторів, електростатичного розпилення (атомізації), термогравіметрія та диференційний термічний аналіз (TG–DTA), диференційна скануюча калориметрія (DSC), рентгеноструктурний та рентгенофазовий аналізи, локальний рентгеноспектральний аналіз (SEM- та TEM-ЕДС), просвічуюча та скануюча електронна мікроскопія високої прецизійності, аналіз 3D-сітки міжзеренних границь трансмісійною просвічуючою мікроскопією надвисокої роздільної здатності, лазерна гранулометрія (DLS), метод Раманівської спектроскопії, теплова десорбція азоту, визначення постійного струму намагнічування нанокераміки, фрактографічний та локальний хімічний аналіз. Широкий набір методів визначення фізико-механічних характеристик, проведенням експлуатаційних випробувань в умовах, наближених до виробничих, 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, а також узгодженістю отриманих експериментальних даних з науковими результатами та положеннями. Перевірка основних наукових результатів роботи, що виконувалась експериментально з використанням сучасних методів дослідження і засобів вимірювання, підтверджує з достатньою для практики точністю справедливість висновків і рекомендацій автора. Це

дозволяє вважати, що отримані результати досліджень дисертації є достатньо обґрунтованими і достовірними.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Практична цінність роботи полягає в розробленій методиці низькотемпературної одностадійної ПС-консолідації багатокатіонних оксидних керамік із надзвичайно дрібним зерном, менше за 20 нм. Практичне значення має також розроблена методика консолидації нанодисперсних керамічних порошків ПС у режимі теплового пробою «спалахом», який фактично дозволяє уникнути росту зерна, а завдяки 2–10-хвилинному повному циклу консолидації в перспективі дасть до 90% економії електроенергії порівняно з будь-яким іншим існуючим методом консолидації керамічних виробів.

Реакційної ПС-консолідація нанокompозитів на основі TiN/AlN та композитів на основі  $V_4C_3$  дозволила отримати об'ємні нанокompозити проходять тести як матеріали-кандидати при виготовленні деталей реакторів керованого термоядерного синтезу та ядерних реакторів на основі нітрид урану. Надзвичайно перспективними є розроблені при підготовці дисертаційної роботи нанокompозити  $V_aC_b-(V_xO_y/BN)$  з міцністю на вигин 800 МПа в інтервалі температур від 25 до 1600 °С. За рахунок управління динамічною в'язкістю руйнування кераміки на основі карбиду бору та збільшення динамічної в'язкості руйнування легких композитів на його основі в п'ять разів – із  $\sim 6$  до  $\sim 30$  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» в НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», та курс із чотирьох лекцій «Нові нанокompозити методом іскро-плазмового спікання» – в Школі матеріалознавства та інженерії Наньянського Технологічного університету (SMSE NTU) Сінгапура.

Керамічні пластини з одночасним найкращим співвідношенням твердості, тріщиностійкості, міцності на вигин і динамічної міцності та питомої ваги кераміки дає змогу до практичного застосування – що підтверджується результатами тестування властивостей пластин  $V_aC_b-(V_xO_y/BN)-nB$ , отриманих автором роботи в «High Speed Dynamic Laboratory» (TL NTU), Сінгапур. Проведено порівняльні тести пластини  $V_aC_b-(V_xO_y/BN)-nB$  із розмірами 100x100x20 мм та комерційних пластин компанії «CeramTech»

(США). З порівняльної таблиці (Акта випробувань) механічних властивостей захисних пластин на основі карбїду кремнію «Sicadur» та карбїду бору «Bocadur» (США) з пластинами складу  $B_aC_b-(B_xO_y/BN)-nB$ , отриманими реакційним ППС, видно, що при тріщиностійкості  $4-5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  пластини мають значно вищу твердість та міцність на вигин, які на 60–90% перевищують міцність кращих комерційних пластин тих самих розмірів. В акті випробувань також 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.

В цілому практичні результати дисертаційної роботи Бородянської Г.Ю. мають перспективу подальшого впровадження на спеціалізованих підприємствах України з виробництва композиційних матеріалів, а також пропонуються для подальшого продовження цього напрямку досліджень в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

Основні результати за матеріалами дисертації, містять основні наукові положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень, висновки та рекомендації. Матеріали дисертації Бородянської 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 змісту та основним положенням дисертації, яка написана на хорошому науково-технічному рівні зі значною кількістю ілюстрованих матеріалів.

### **Характеристика роботи**

Наукова робота представлена у вигляді рукопису, складається зі вступу, восьми розділів, загальних висновків. Робота містить 388 сторінки, основний зміст якої викладено на 323 сторінках, що має 126 рисунків, 19 таблиць, список з 431 використаних літературних джерел і 4 додатків. Автореферат повною мірою відображає зміст дисертації.

У **вступі** здобувач виклала актуальність теми, показала сучасний стан наукової проблеми отримання наноструктурних композитів, поставила мету і задачі виконаних досліджень, розкрила наукову новизну та практичну

цінність, зробила аналіз достовірності отриманих наукових результатів та представила повний список публікацій за темою роботи й її апробацію.

**Перший розділ** роботи присвячено перевагам методу іскро-плазмового спікання для отримання наноструктурних керамік. Показано важливість контролю всіх параметрів як вихідних порошків так і управління параметрами системи в процесі ІПС консолідації. Обґрунтовано вибір для дослідження консолідації наноструктурних керамік з різною природою хімічного зв'язку та різним типом провідності. Метод спікання в режимі теплового пробою «спалахом» (*Flash sintering*) розглянуто, як ймовірний спосіб консолідації в умовах ІПС. Все це дало змогу оцінити актуальність теми і дозволило автору визначити мету роботи та основні задачі.

**Другий розділ** присвячено ІПС консолідації оксидних керамік на основі нанокристалічних діоксиду цирконію, легованого оксидом ітрію, та оксиду церію, легованого оксидом гадолінію які мають киснево-іонний тип провідності. Проведена оцінка енергії активації процесу консолідації, а саме залежність від прикладеного зовнішнього тиску, досліджено механізми консолідації та еволюція мікроструктури під час ІПС-консолідації сфер діоксиду цирконію. Зроблені адсорбційно-структурні дослідження та вивчена еволюція порового простору від режимів ІПС. Проведено низькотемпературна ІПС безпористих керамік із нано-зерном за рахунок контролю гомогенності структури, що дозволило отримати кераміку з зерном ~70 нм для кубічного стабілізованого оксидом ітрію діоксиду цирконію, та з зерном ~18 нм для оксиду церію.

**Третій розділ** присвячено спіканню в режимі теплового пробою–«спалахом», який завдяки високій локалізації процесу нагрівання та короткому часу обробки забезпечує умови ущільнення зразків, що дозволяє уникнути росту нанозерна. Вперше було виконано експериментальне дослідження нового методу консолідації, що поєднав у собі «традиційне» ІПС та спікання «спалахом» і був названий ІПС в режимі теплового пробою «спалахом». Доведено, що консолідація нанодисперсних оксидних порошків методом ІПС в режимі теплового пробою «спалахом» забезпечує унікальні умови для надшвидкого ущільнення зразків нанокристалічних порошків, за якого швидкість внутрішньоагрегатного та міжагрегатного ущільнень є однаковою і відбувається квазі-одностадійна консолідація.

**Четвертий розділ** присвячено поєднанню методики локалізації реакцій синтезу в об'ємах нанореакторів, нановибухової кальцинації/гомогенізації складу багатокатіонних оксидів та методу іскро-плазмового спікання, що дало змогу синтезувати та консолідувати в масивні зразки надзвичайно складні чотири- та п'ятикатіонні оксиди допованого оксидами стронцію та магнійгалат-лантану ( $\text{La}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}(\text{Ga}_{0,9}\text{Mg}_{0,1})\text{O}_{3-\delta}$  (LSGM) та його композиту з 2% (мас.) оксиду церію (LSGM–Ce). Отримання щільного складного оксиду з

розміром зерна  $\sim 14$  нм дозволило показати можливість зміни його фізичних властивостей, а саме феромагнітні властивості на відміну від традиційних парамагнітних властивостей, характерних для тієї самої кераміки, але з більш грубим зерном.

**П'ятий розділ** присвячено ІПС консолідації нітридних керамік, автором проведена реакційна ІПС-консолідація кубічного нанокompозиту  $Ti_{0,82}Al_{0,18}N$ , армованого нананокристаллами гексагонального нітриду алюмінію, що показав твердість за Віккерсом 17–21 ГПа (ІПС при 1500 °С) та 24–29 ГПа (ІПС при 1600 °С). Оптимізація режиму ІПС наноструктурного композиту  $60Si_3N_4-40TiN$ , зниження температури консолідації на 350 °С, порівняно з гарячим пресуванням, дала змогу зміцнити міжзеренні границі між нанозернами.

**В шостому розділі** автор розвиває розроблений метод реакційного ІПС-консолідації для композитів на основі  $B_aC_b-(B_xO_y/BN)$ . Доведено, що під час реакційного ІПС зменшується розмір кристалітів, з яких складаються зерна спеченого карбїду бору, і утворюється безперервна 3D-мережа границь зерен, що фактично є ламелярними шарами турбостратного нітриду бору та пронизуючого або заміщаючого його оксиду бору  $B_xO_y$ . В розділі проведена оцінка енергії активації і зроблені висновки що до механізмів консолідації карбїду бору в умовах ІПС. При вивченні механічних властивостей показано внесок комплексної морфології композитів, і особливо твердих фаз, синтезованих під час реакційного ІПС, на границях зерен карбїду бору, зміни співвідношення бору до вуглецю в самих зернах карбїду бору (утворення  $B_{13}C_2$ ). Виконано аналіз статичних та динамічних механічних властивостей керамік отриманих з вихідного порошку карбїду бору в умовах реакційного та нереакційного ІПС. Автор показала, що створення 3D-сітки границь дає можливість п'ятикратного збільшення динамічної в'язкості руйнування  $B_aC_b-(B_xO_y/BN)$  композитів.

**В сьомому розділі** дисертації проведено комплексний аналіз отриманих на основі карбїду бору наноструктурних керамік, вихідні порошки різного фазового складу. Представлена характеристика отриманих керамік в залежності від умов реакційного та нереакційного ІПС виконана на високому науковому рівні. Досліджено вплив домішок у вихідних порошках на механічні властивості, та встановлено, що залежно від режиму та атмосфери ІПС-консолідації кераміка демонструє міцність на триточковий вигін при кімнатній температурі в діапазоні 350–550 МПа, та високотемпературна міцність на вигін отриманої кераміки перевищує 400 МПа. Проведено досконалий аналіз механізмів розтріскування/зміцнення отриманих керамік які продемонстрували підвищення міцності.

**Восьмий розділ** присвячено впливу параметрів реакційної та нереакційної ІПС-консолідації на зміцнення  $B_aC_b-(B_xO_y/BN)$  кераміки.



Раманівська спектроскопія показала, що залежно від умов та режимів ПС співвідношення бору до вуглецю в карбіді бору змінювалося. Проаналізовано кореляцію між складом керамік, їх тріщиностійкістю, твердістю та низькотемпературною і високотемпературною міцністю на триточковий вигин. Краща  $B_{13}C_2-(B_xO_y/VN)$  кераміка продемонструвала міцність на вигин до 800 МПа при 1600 °С. Показано, що вторинні фази, їхнє співвідношення і взаємозв'язок із матричною ВС-фазою детермінують рівень  $\sigma$  при 25 °С,  $\sigma$  при 1600 °С,  $HV$  та  $K_{IC}$  за наступними закономірностями:

- Твердість зростає, а  $\sigma$  при 25 °С знижується зі збільшенням  $K_{IC}$  незалежно від домішок та режиму ПС. Міцність на вигин при підвищенні температури тестування така сама або несуттєво зростає, а механізми руйнування, за даними фрактографічного аналізу, не змінюються в усьому температурному діапазоні.

- Показано існування двох діапазонів високої та низької  $K_{IC}$  із граничним значенням  $4,1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$  і співвідношення  $\sigma_{1600 \text{ °С}}/\sigma_{25 \text{ °С}}$  вище для нижчої  $K_{IC}$ . Кераміка, отримана реакційним ПС у потоці азоту показала нижче значення тріщиностійкості, але вищу міцність на вигин.

- Зміцнення карбиду бору досягається оптимізацією співвідношення бору до вуглецю і створенням зернограничної ламелярної сітки з карбиду, нітриду та оксиду бору та утворенням в композиті вторинних фаз на основі кремнію (Si-B-C-(O, N)).

До представленої дисертаційної роботи слід також висловити наступні зауваження.

1. Робота присвячена вирішенню науково-технічної проблеми створення щільної наноструктурної кераміки з різними типом провідності і природою хімічного зв'язку, але, нажаль, вона не містить узагальнюючого висновку про закономірності впливу типу провідності і природи хімічного зв'язку на параметри процесу електро-іскрової консолідації або структуру та властивості матеріалів, одержувані даним методом, що дозволило б підкреслити цілісність роботи.

2. У актах випробування балістичної здатності (визначення глибини проникнення та «ефективності маси (mass efficiency)») матеріалів на основі карбиду бору, що одержані автором методом електроіскрового спікання, вони порівнюються з матеріалами на основі карбиду кремнію. У одному акті (додаток В) згадується і про порівняння з матеріалами на основі карбиду бору, але у висновку тільки сказано, що матеріали, розроблені автором, є конкурентоспроможними по відношенню до матеріалів на основі карбиду бору і карбиду кремнію, але їх ефективна маса (що, як впливає з актів, є визначальним показником броньової стійкості) все ж дещо менша за ефективну масу броні на основі карбиду кремнію (про ефективну масу матеріалів на основі карбиду бору, що випускаються промисловістю, у акті не

згадується). У цьому акті також зазначається, що зразки надані автором, були на 5.3-6 мм тоншими. Тобто, з актів не можна зробити однозначного висновку про те, наскільки консолідований матеріал в умовах електроплазмового спікання крацій (і чи крацій) за існуючі комерційні броньові матеріали. У висновку 7 (стор 322-323) сказано, що автором одержані зразки товщиною до 20 мм і, напевно, їх би краще було порівняти зі зразками карбіду кремнію товщиною 20 мм.

Порівняння властивостей на Рис.8.4, 8.10 та 8.11 з літературними даними також не є переконливим, оскільки, по-перше, автор не наводить жодних відомостей про те, у яких умовах авторами посилянь одержані дані результати і, по-друге, навряд чи можна однозначно співставити результати випробувань твердості, тріщиностійкості методом індентування, міцності підчас згинання, що одержані на різному обладнанні різними операторами і ймовірно при різному навантаженні чи на зразках різної геометричної форми.

Крім того, при навантаженні 1 кг розмір відбитку індентора (рис. 7.15) на карбіді бору, спеченому автором у азоті, близький до 22x22 мкм, а на рис.6.6 для карбіду бору із зернограничною 3D-сіткою турбостратного нітриду бору становить 19x19 мкм (що відповідає твердості за Віккерсом ~49 ГПа), при цьому з кутів відбитків, що наведені на обох рисунках, розповсюджуються досить довгі тріщини. Слід зазначити, що розмір відбитку індентора на матеріалі плитки з карбіді бору (розміром 90x90x8 мм), що серійно випускався у ІНМ НАНУ, становить 19x19,7 мм - 22x21мм при навантаженні 1 кг і при цьому тріщини з кутів відбитків практично відсутні, розмір зерен у цьому матеріалі – близький до 10 мкм (прошарки з турбостратного нітриду бору не спостерігаються).

Тому, на мій погляд, висновок на стор. 322-323 про те, що автором в результаті масштабування (до 100 мм діаметром та до 20 мм висотою) створено новий клас легкої кераміки з комплексом властивостей, що на 35-45% кращі порівняно «...з усіма існуючими до цього часу...» керамічними матеріалами, не є беззаперечно обґрунтованим. .

3. На стор. 81 (літературний огляд) робиться висновок, що високощільну кераміку на основі карбіду бору методом гарячого пресування можна одержати лише під тиском 300 МПа, але ця цифра завищена на порядок, і, насправді, саме при електроіскровому спіканні автором застосовуються тики вищі, ніж при гарячому пресуванні (35-120 МПа)

Однак, наведені зауваження не впливають на загальне позитивне враження від роботи і не знижують загального високого рівня результатів досліджень. Дисертаційна робота Бородянської Г.Ю. «Особливості консолідації, формування структури і властивостей керамічних матеріалів у процесах іскро-плазмового спікання» є оригінальною завершеною науково-дослідною роботою, містить нові фундаментальні та прикладні результати, що в достатній мірі апробовані і можуть бути впроваджені у виробництво та навчальні процеси.

Дисертаційна робота Бородянської Г.Ю. «Особливості консолідації, формування структури і властивостей керамічних матеріалів у процесах іскро-плазмового спікання» задовольняє всім 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, безсумнівно, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент:  
член-кор. НАН України,  
д.т. н., професор, академік  
Міжнародної академії кераміки,  
завідувач відділу технології високих  
тисків, функціональних керамічних  
композитів та дисперсних надтвердих  
матеріалів ІНМ НАН України

 — Т.О.Пріхна

Підпис Т. О. Пріхни засвідчую:  
Вчений секретар  
Інституту надтвердих матеріалів  
ім. В. М. Бакуля НАН України, к. т. н.



В. В. Смоквина