**ВИСНОВОК**

спеціалізованої вченої ради Д 26.001.23

Київського національного університету імені Тараса Шевченка

про дисертаційну роботу **Попова Олексія Юрійовича**

**«Реакційний синтез та структурне конструювання бор-містких керамічних матеріалів»**,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла

Дисертація Попова О.Ю. є завершеною кваліфікаційною науковою працею, яку виконано відповідно до плану науково-дослідної роботи кафедри фізики металів фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, науковий консультант – член-кореспондент НАН України доктор фізико-математичних наук, професор Макара В.А. Робота виконана згідно із державними бюджетними темами: № 01БФ051-08 “Фізико-хімічні основи cтворення і методи дослідження фізичних характеристик нових неоднорідних одно- та багатокомпонентних матеріалів (у тому числі монокристалічних, мікрокристалічних та наноструктурних) з перехідними та лужними металами та їх сполуками” (2006 – 2010 рр.); № 11БФ051-01 «Фундаментальні дослідження в галузі фізики конденсованого стану і елементарних частинок, астрономії і матеріалознавства для створення основ новітніх технологій» (2011 – 2015 рр.); № 15БФ051-04 «Формування структури та фазового складу керамічних композиційних матеріалів на основі карбіду бору в процесі реакційного синтезу» (2015 – 2017 рр.).

У дисертації досліджено механізми впливу *in situ* екзотермічних реакцій на формування структури боридної кераміки та розроблено ряд підходів до реакційного синтезу бор-містких керамічних композицій із наперед заданими структурними та механічними характеристиками.

**Актуальність** теми дисертаційної роботи зумовлено потребами машинобудування в нових жаростійких матеріалах із високими фізико-механічними характеристиками. Вивчення кінетичних закономірностей та механізмів реакційного синтезу тугоплавких сполук, проведене в даній роботі, істотно розширило можливості щодо створення різноманітних композиційних структур, що, разом із теоретичним прогнозуванням механічних характеристик гетерофазних матеріалів, дозволило розробити методику одержання новітніх керамічних композитів із наперед заданими властивостями. Таким чином, актуальність даної роботи є безсумнівною.

Отримані в дисертації результати є **новими**. Серед них особливо можна виділити такі:

– Розроблено модель для розрахунку тріщиностійкості, енергії руйнування та міцності крихких композиційних матеріалів. На відміну від попередніх підходів, модель не містить жодного невизначеного феноменологічного параметру та дозволяє прогнозувати механічні характеристики керамічного композиту, виходячи з фізико-механічних властивостей його компонентів та геометрії відповідних зерен, а також міцності міжфазного зв’язку за тих чи інших умов синтезу матеріалу. Розвинений підхід дозволяє оцінити вплив як високомодульних, так і низькомодульних включень другої фази на характеристики матеріалу та сформулювати рекомендації щодо особливостей структури керамічного композиту, що їх необхідно забезпечити для досягнення потрібних властивостей створюваного матеріалу. Зокрема, показано, що для одержання високих значень тріщиностійкості та енергії руйнування оптимальний розмір високомодульних включень перевищує 30мкм, в той час як оптимальний розмір низькомодульних (із модулем Юнга на порядок меншим, ніж у матриці) включень є меншим за 1мкм.

– Вперше визначено особливості хімічної кінетики утворення тугоплавких фаз дибориду титану, монобориду хрому та оксиду алюмінію внаслідок протікання екзотермічних реакцій при нагріванні порошкових сумішей Al-B2O3-Ti, Al-B2O3-Cr2O3, Al-B-Ti та встановлено механізми ущільнення та формування структури керамічних композитів в даних системах. Доведено можливість виготовлення тугоплавких матеріалів шляхом реакційного синтезу легкоплавких вихідних композицій та показано, що створення компактного твердого тіла в цьому випадку протікає в три основні етапи: 1) первинна консолідація шихти, пов’язана із заповненням порожнин проміжним реакційним розплавом; 2) формування вторинної поруватості внаслідок дилатометричного ефекту, що завжди супроводжує виділення з розплаву нових тугоплавких фаз; 3) зникнення вторинної поруватості за рахунок пластичної деформації новоутворених зерен.

– Вперше запропоновано використання методу рідкофазного реакційного синтезу до формування наперед заданої структури композиційного матеріалу типу дрібнодисперсна матриця – інертне включення та показано, що для виготовлення композиту такого типу необхідно виконання наступних умов: 1) температура гарячого пресування матеріалу має перевищувати температури плавлення більшості компонентів вихідної реакційної суміші; 2) адіабатична температура відповідної екзотермічної реакції має перевищувати температуру плавлення інертної фази з метою оплавлення поверхневого шару включень під час ущільнення шихти; 3) жоден з продуктів очікуваної реакції не повинен співпадати із речовиною інертних включень. Застосування даного підходу вперше дозволило синтезувати композиційний матеріал на основі великих (~50мкм) включень TiB2 в дрібнодисперсній матриці складу Al2O3-B4C, що містить нанорозмірні частки карбіду бору. Запропонований підхід може бути поширений на інші системи та композиції.

– Вперше встановлено, що взаємодія між карбідами титану та бору, наслідком якої є формування дибориду титану та виділення вільного вуглецю, починається при температурі 1200 ℃ та істотно прискорюється при 1800 ℃ внаслідок інтенсивної сублімації бору з поверхні його карбіду. Протікання вказаної взаємодії під час ущільнення порошкової шихти дозволило ввести в жорстку керамічну матрицю субмікронні включення графіту та створити серію гетеромодульних композиційних матеріалів систем TiC-TiB2-C, TiB2-SiC-C, ТіВ2-С та B4C-TiB2-C при температурі 1850 ℃ та тискові 30МПа протягом 16 хвилин. Наявність графітових включень зумовила істотне підвищення механічних характеристик виготовлених матеріалів та дозволила досягти значення тріщиностійкості 10МПа‧м1/2.

**Достовірність** та надійність наукових положень, висновків роботи та одержаних результатів забезпечені використанням широкого інструментарію сучасних фізичних та механічних методів досліджень, застосуванням сучасного обладнання, наданням прозорих аналітичних викладок, обговоренням отриманих результатів на наукових семінарах та конференціях, публікаціями в українських та закордонних фахових виданнях, зокрема у виданнях, що входять до переліку журналів з міжнародних наукометричних баз даних *Scopus* та *Web of Science*.

**Наукове та практичне значення**. Розроблена в роботі методика обчислення тріщиностійкості та енергії руйнування керамічної композиції поглиблює розуміння процесів руйнування крихких гетерофазних матеріалів та дозволяє прогнозувати структурні характеристики керамічних матеріалів для підвищення тріщиностійкості та енергії руйнування.

Встановлені кінетичні закономірності та фізичні механізми утворення нових тугоплавких фаз диборидів перехідних металів, оксиду алюмінію, монобориду хрому, карбідів бору та кремнію та інших в процесі високотемпературного відпалу фазово-нерівноважних порошкових сумішей дозволили розвинути концепцію реакційного синтезу тугоплавких композитів із наперед заданими структурами типу: (1) ультрадрібнодисперсна керамічна матриця – інертне високомодульне включення та (2) жорстка високомодульна матриця – субмікронне графітове включення, яка може бути використана для створення широкого кола високоякісних матеріалів.

Синтезовані керамічні матеріали систем Cr-ТіB2-Al2O3, ТіB2-Al2O3, ТіВ2-ТіС-С, ТіВ2-В4С-С, ТіВ2-С, ТіB2-Al2O3-В4С, TiB2-SiC-C мають високі механічні характеристики (мікротвердість до 24ГПа та тріщиностійкість до 10МПа‧м1/2) та можуть бути застосовані в якості елементів керамічної броні, ріжучих елементів металообробного та бурового інструменту, футеровки котлів теплоелектростанцій.

**Рекомендації щодо використання результатів дисертаційної роботи**. Виходячи із вказаного вище, спеціалізована рада Д.26.001.23 відзначає, що в дисертації Попова О.Ю. одержано нові та важливі з точки зору їх можливого застосування результати, які можуть бути використані у таких установах: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Інститут металофізики імені Курдюмова НАН України, Інститут проблем матеріалознавства імені Францевича НАН України, Інститут надтвердих матеріалів імені Бакуля НАН України, Національний технічний університет «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського».

Матеріали дисертації можуть виявитись корисними в курсах лекцій з матеріалознавства, композиційних матеріалів, фізики фазових переходів та фізики наноструктурованих матеріалів у вищих навчальних закладах.

За темою дисертації опубліковано 42 наукових працях. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 26 наукових статтях у провідних профільних журналах (з яких 7 статейвходять до переліку журналів з міжнародних наукометричних баз даних *Scopus* та *Web of Science*) та 16 тезах доповідей на національних та міжнародних конференціях. У роботах, опублікованих у співавторстві, дисертант був автором основної ідеї досліджень, а також самостійно одержав вагому частку експериментальних результатів, виконував їхній аналіз та тлумачення; був автором текстів, перекладу на англійську мову та висновків відповідних робіт. Усі наукові результати, положення і висновки, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто.

**Оцінка мови та стилю дисертації**. Дисертація та автореферат написані українською мовою. Результати та висновки дисертації викладені чітко та аргументовано.

**Відповідність дисертації визначеній спеціальності**. За змістом дисертація відповідає спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Спеціалізована вчена рада Д 26.001.08 вважає, що за обсягом та рівнем проведених наукових досліджень, їх актуальністю, науковою новизною, практичною цінністю, кількістю та рівнем публікацій дисертаційна робота «Реакційний синтез та структурне конструювання бор-містких керамічних матеріалів» відповідає вимогам МОН України до докторських дисертацій, зокрема, пп. 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 року (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р. та №567 від 27.07.2016 р.), а її автор, Попов Олексій Юрійович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

**Голова спеціалізованої вченої ради Д 26.001.23** *І.М. Дмитрук*

**Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.001.23** *М.П. Семенько*