Попов Олексій Юрійович, доцент кафедри фізики металів Київського національного університету іме&shy;ні Тараса Шевченка: &laquo;Реакційний синтез та структур&shy;не конструювання бор-містких керамічних матеріалів&raquo; (01.04.07 - фізика твердого тіла). Спецрада Д 26.001.23 у Київському національному університеті імені Тараса Шев&shy;ченка

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

ПОПОВ ОЛЕКСІЙ ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.762

ДИСЕРТАЦІЯ

РЕАКЦІЙНИЙ СИНТЕЗ ТА СТРУКТУРНЕ КОНСТРУЮВАННЯ

БОР-МІСТКИХ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Спеціальність 01.04.07 “фізика твердого тіла”

Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,

результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ О.Ю. Попов

Науковий консультант Макара Володимир Арсенійович, доктор фіз.-мат.

наук, член-кор. НАН України, професор

Київ 2018

Зміст

Перелік умовних позначень………………………………………………...21

Вступ………………………………………………………………………….22

Розділ 1. Фізико-механічні характеристики

та методи виготовлення керамічних матеріалів………………….……30

1.1. Переваги кераміки…………………………………………………...….30

1.2. Проблеми, пов’язані із використанням матеріалів на основі

ковалентних сполук………………………………………………………….35

1.3. Зв’язок між структурою та механічними характеристиками керамічних

матеріалів……………………………………………………………………..40

1.4. Особливості процесу спікання порошкової шихти……………………51

1.5. Інтенсифікація процесу ущільнення керамічного матеріалу шляхом

прикладання зовнішнього тиску…………………………………………….57

Розділ 2. Реакційне гаряче пресування як метод створення

тугоплавких матеріалів……………………………………………….……62

2.1. Механізми та кінетика твердофазних реакцій…………………………62

2.1.1. Дифузійні моделі………………………………………………………66

2.1.2. Моделі зародкоутворення……………………………………………..68

2.1.3. Моделі реакцій, що контролюються процесами

на міжфазній поверхні………………………………………………………..71

2.2. Вплив in situ реакцій на процеси виготовлення

керамічних матеріалів………………………………………………………..72

2.3. Вплив реакцій на структуру та механічні характеристики керамічних

матеріалів……………………………………………………………………...80

Розділ 3. Методика експериментальних досліджень……………………88

3.1. Виготовлення дослідних зразків…………………………….…………..88

3.2. Визначення мікротвердості………………………………….…………..89

3.3. Визначення тріщиностійкості……………………………………………90

3.4. Рентгенівський фазовий аналіз виготовлених зразків…………………92

3.5. Методика визначення густини зразків………………………………….94

18

3.6. Визначення ступеня перетворення, швидкості

та енергії активації хімічних реакцій………………………………………..95

3.7. Похибки експериментальних досліджень……………………………...97

3.8. Електронна мікроскопія…………………………………………………98

3.9. Розрахунок теплового ефекту реакції та

адіабатичної температури……………………………………………………101

3.10. Визначення міцності на вигин…………………………………………102

Розділ 4. Конструювання структури композиційного матеріалу з метою

покращення механічних характеристик ………………..………………103

4.1. Аналітична модель розрахунку тріщиностійкості та енергії руйнування

двофазного матричного композиту із високомодульними включеннями..105

4.2. Особливості механічних властивостей гетеромодульних керамічних

композицій…………………………………………………………………….121

4.3. Вплив in situ реакцій на структуру та механічні характеристики

гетеромодульних матеріалів системи ТіВ2−SiC−C………………....………127

4.4. Моделювання впливу м’яких включень на енергію руйнування та

тріщиностійкість керамічних матеріалів…………………………………….135

Розділ 5. Конструювання структури гетеромодульної кераміки системи

TiB2-TiC-B4C-C шляхом реакційного гарячого пресування карбідів

титану та бору………………………………………………………….……..148

5.1. Вплив in-situ включень вуглецю на механічні характеристики керамік,

виготовлених шляхом реакційного гарячого пресування порошків системи

TiC-B4C…………………………………………………………………………148

5.2. Вплив in-situ взаємодії між карбідами бору та титану на кінетику

ущільнення та структуроутворення гетеромодульних керамічних матеріалів

систем TiC-TiB2-C та B4C-TiB2-C……………………………………………..158

5.3. Механізми та кінетика утворення нових фаз протягом

високотемпературної взаємодії карбідів титану та бору…………………….173

5.4. Напрямки практичного застосування гетеромодульних та

мікропоруватих матеріалів…………………………………………………….188

19

5.3.1. Теоретичне дослідження впливу поруватості на кінетику деградації

міцності боридів внаслідок гелійового розпухання під дією нейтронного

опромінення…………………………………………………………………..196

Розділ 6. Особливості кінетики формування структури матеріалів під час

реакційного спікання за наявності проміжної рідкої фази……………208

6.1. Особливості формування тугоплавких фаз в системах Ti-Al-B2O3, Cr2O3-

Al-B2O3 та Ti-Al-B …………………………………………………………...208

6.1.1. Кінетичні закономірності взаємодії в системі Ti-Al-B2O3 при

температурах 900 – 1400°C………………………………………………….208

6.1.2. Кінетика взаємодії в системі Ti-Al-B при 900 – 1400°C…………….220

6.1.3. Особливості взаємодії в системі Al - Cr2O3 - B2O3…………………..226

6.2. Стехіометрична суміш Ti-2Al-B2O3: структура та механічні

характеристики компактної кераміки………………………………………232

6.3. Стехіометрична суміш Ti-2Al-B2O3: ущільнення, механічні

характеристики, структура………………………………………………….238

6.4. Суміш Ti-2B-17%Al: структура та механічні характеристики

реакційнопресованих матеріалів………………………………………...…247

6.5. Формування структури шаруватих композиційних матеріалів на основі

системи Ti-TiB2……………………………………………………………..253

Розділ 7. Конструювання композиційної структури типу дрібнодисперсна

матриця – високомодульне включення шляхом рідкофазного

реакційного спікання із інертною фазою…………………………........260

7.1. Система Ti-Al-B2O3-TiB2: оптимізація вмісту баластної фази……...260

7.2. Система Cr2O3-Al-TiB2: формування структури та механічні

характеристики…………………..…………………………………………263

7.3. Система B2O3-Al-C-TiB2: структура, склад,

механічні характеристики…………………………………………………267

Загальні висновки………………………………………………………..277

Перелік посилань…………………………………………………..……....279

20

Перелік умовних позначень

К1 – коефіцієнт інтенсивності напружень у вершині тріщини першого роду,

К1С –тріщиностійкість,

Е – модуль Юнга,

G – модуль зсуву,

b – вектор Бюргерса,

τ – напруження зсуву,

x/d – відносний розмір шийки при спіканні зерен,

γ – енергія руйнування,

𝛾𝑚𝑒𝑓 – ефективна енергія руйнування матриці,

𝛾𝑠𝑒𝑓 – ефективна енергія руйнування стопору,

С – довжина тріщини,

σth – теоретична границя міцності,

σ – границя міцності на вигин,

σc – границя міцності на розтяг,

Р – об’ємний вміст пор,

Нv – мікротвердість за Вікерсом,

η – об’ємна доля фази,

 – коефіцієнт Пуассона,

R1 – радіус кривизни ділянки фронту тріщини між двома стопорами,

2 - центральний кут ділянки фронту тріщини між двома стопорами,

𝑙1, 𝑙2 – довжини ділянок фронту тріщини в матриці та на стопорі відповідно,

Tm – температура плавлення речовини,

d – середній розмір зерна фази,

α – ступінь перетворення,

D – коефіцієнт дифузії,

RC – критичний розмір зародка нової фази,

ΔH – ентальпія реакції,

Tad – адіабатична температура,

21

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. В сучасному

матеріалознавстві особливо цікавими є боридо- та карбідомісткі кераміки,

унікальні фізико-механічні властивості яких вже зараз обумовлюють

застосування їх в багатьох галузях машинобудування. Так, велика

мікротвердість дає змогу використовувати їх для обробки та різання металів

та гірських порід; високі значення модулів Юнга, порівняно мала густина та

деякі особливості високошвидкісного руйнування роблять можливим

створення на їх основі елементів керамічної броні; високі температура

плавлення, жаро- та корозійностійкість зумовлюють можливість їхнього

використання для роботи в екстремальних умовах; інтенсивне поглинання

боридами нейтронів та γ-квантів робить їх перспективними конструкційними

матеріалами, призначеними для збереження ядерного палива та радіоактивних

відходів. Важливість останньої задачі посилюється наближенням терміну

відпрацювання ресурсу першими енергетичними блоками АЕС України та,

відповідно, різким зростанням об'єму радіоактивних відходів.

На сьогоднішній день широкому використанню керамічних виробів

перешкоджають дві основні проблеми: висока крихкість та необхідність

підтримання надзвичайно високих (більше 2000ºС) температур протягом

десятків хвилин для виготовлення компактного керамічного матеріалу. Перша

з зазначених проблем пов’язана із природою ковалентних зв’язків та полягає

у низькій тріщиностійкості керамік. Маючи рівень твердості, що може

перевищувати відповідні значення для металів у десятки разів, керамічний

матеріал є надзвичайно чутливим до наявності в ньому навіть незначних

дефектів: подряпина або внутрішній двовимірний дефект із характерним

розміром в соті міліметра може призвести до виникнення магістральної

тріщини та катастрофічного руйнування зразка при навантаженнях, що

можуть бути в декілька разів меншими за міцність матеріалу. Іншим проявом

крихкості керамік є те, що відносно незначні ударні навантаження, рівень яких

22

не здатний заподіяти ніякої шкоди звичайним металам, можуть повністю

зруйнувати навіть високоякісний керамічний виріб.

Найвищі механічні характеристики мають керамічні матеріали,

виготовлені за методом гарячого пресування, коли дрібнодисперсні порошки

в спеціальних пресформах (як правило графітових) розігріваються до

температур 0,7 – 0,9 від їхньої температури плавлення під тиском 100 і більше

атмосфер. Це означає, що другою серйозною перешкодою у створенні

конкурентоспроможних керамічних виробів є надзвичайно висока

собівартість виготовлення відповідних матеріалів, адже, враховуючи їхні

точки плавлення, для ущільнення порошкової шихти необхідно підтримання

високих (часто більших за 2000℃) температур протягом десятків хвилин.

Основним способом підвищення тріщиностійкості кераміки є

виготовлення композитів. Метою об’єднання декількох фаз в єдиний

керамічний матеріал є створення різноманітних структур, що тим чи іншим

чином перешкоджають рухові тріщини, спотворюють її геометрію та

знижують імовірність виникнення руйнівних дефектів.

На сьогоднішній день існує значна база даних, що дозволяє пов’язати ті

чи інші геометричні характеристики різних компонентів композиційного

матеріалу із характером поширення в ньому навантаженого двовимірного

дефекту, однак, існуючі моделі оцінки механічних характеристик

(тріщиностійкості, міцності, енергії руйнування) гетерофазних керамік носять

здебільшого якісний або феноменологічний характер. Інші, суто теоретичні

моделі, як правило містять певну кількість феноменологічних величин із

невизначеним фізичним змістом, що дозволяє використовувати їх для

пояснення тих чи інших ефектів зміцнення вже створених матеріалів, але

ускладнює застосування теоретичних розрахунків такого типу для

прогнозування властивостей нових систем.

Схожа ситуація може бути відмічена і в області створення

композиційних керамік. Основна кількість робіт присвячена

експериментальному вивченню еволюції структури одержаних матеріалів

23

внаслідок зміни тих чи інших параметрів режиму виготовлення та

характеристик вихідного порошку. Хоча накопичення експериментальної

інформації в даному напрямку є, безумовно, важливим етапом наукового

пошуку, зараз настає час для застосування зворотного підходу: розробки

фізичних та феноменологічних основ для надання рекомендацій щодо підбору

вихідного складу та режимів синтезу композиційних матеріалів із

прогнозованими структурними та механічними характеристиками.

Останнім часом особлива увага приділяється можливості фізикохімічної взаємодії між зернами вихідних порошків під час гарячого пресування.

Така взаємодія, із розпадом одних речовин та синтезом інших, дозволяє істотно

зменшити тривалість та температуру процесу, а отже і собівартість

виготовлення матеріалу. Окрім того, інтенсивні фізико-хімічні перетворення

під час ущільнення порошкової шихти повністю визначають структурні

характеристики синтезованої кераміки.

Таким чином, вивчення кінетичних закономірностей та механізмів

реакційного синтезу тугоплавких сполук може істотно розширити можливості

щодо створення різноманітних композиційних структур, що, разом із

теоретичним прогнозуванням механічних характеристик гетерофазних

матеріалів, дозволить розробити підходи до одержання новітніх керамічних

композитів із наперед заданими властивостями.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана згідно із держ. 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

24

композиційних матеріалів на основі карбіду бору в процесі реакційного

синтезу» (2015 – 2017 рр.).

Метою даної роботи є вивчення механізмів впливу in situ екзотермічних

реакцій на формування структури боридної кераміки та розробка методики

реакційного синтезу бор-містких керамічних композицій із наперед заданими

структурними та механічними характеристиками.

Відповідно до мети основними задачами були:

- розробка теоретичної моделі для оцінки впливу високомодульних та

низькомодульних включень на тріщиностійкість та енергію руйнування

крихких матеріалів;

- теоретичне прогнозування композиційних структур, оптимальних з

точки зору максимізації механічних характеристик;

- встановлення зв’язку між особливостями хімічної кінетики утворення

тугоплавких фаз та механізмами формування структури керамічних

композицій;

- розробка системи рекомендацій щодо створення оптимальних структур

методом реакційного гарячого пресування.

Об’єктом дослідження роботи були особливості хімічної кінетики

утворення тугоплавких фаз, механізми утворення структури композиційних

матеріалів, синтезованих із застосуванням in situ екзотермічних реакцій,

теоретичне моделювання руху тріщини та розрахунок механічних

характеристик гетерофазних матеріалів, структура та механічні властивості

композитів.

Предмет дослідження – тугоплавкі композиційні матеріали систем CrB2-

Al2O3, ТіB2-Al2O3, ТіВ2-ТіС-С, ТіВ2-В4С-С, ТіВ2-С, TiB2-SiC-C, ТіB2-Al2O3-

В4С, виготовлені методом реакційного гарячого пресування.

Методи досліджень: рентгенівська дифрактометрія, електронна та

оптична мікроскопія, енергодисперсійний аналіз, дослідження міцності на

вигин, визначення мікротвердості та тріщиностійкості за допомогою

індентування, теоретичне моделювання, статистичний аналіз.

25

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Отримала подальший розвиток теоретична 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 фізикомеханічних 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 30µм, в той час як оптимальний розмір

низькомодульних (із модулем Юнга на порядок меншим, ніж у матриці)

включень є меншим за 1µм.

2. 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

26

розплаву нових тугоплавких фаз; 3) зникнення вторинної поруватості за

рахунок пластичної деформації новоутворених зерен.

3. 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.

4. 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

.

27

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена в роботі

методика обчислення тріщиностійкості та енергії руйнування керамічної

композиції дозволяє підбирати компоненти та прогнозувати структурні

характеристики керамічних матеріалів із високими механічними

характеристиками.

Розвинена концепція реакційного синтезу тугоплавких композитів із

наперед заданими структурами типу: (1) ультрадрібнодисперсна керамічна

матриця – інертне високомодульне включення та (2) жорстка високомодульна

матриця – субмікронне графітове включення 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.

Особистий внесок автора. Автор є безпосереднім розробником усіх

наведених в роботі теоретичних моделей та підходів до структурного

конструювання композиційних матеріалів. Автор є основним виконавцем

представлених в роботі експериментальних даних, їхнього аналізу та

тлумачення. Дослідження безконтактної взаємодії між карбідами титану та

бору, а також виготовлення та дослідження композиційних матеріалів системи

TiB2-SiC-C проводилося спільно із канд. ф.-м. н. Чорнобуком С.В.

Виготовлення зразків системи ТіС-В4С було проведене спільно із Тоцьким

І.М. Дослідження фізико-хімічної взаємодії, а також виготовлення та

дослідження механічних характеристик керамічних композитів на основі

системи Al-B2O3-Ti було проведене спільно з канд. ф.-м. н. Клепко О.Ю.

Синтез та дослідження керамічних матеріалів системи ТіB2-Al2O3-В4С був

проведений спільно із Сіваком О.А. Аналіз дослідних зразків методами

електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу був проведений

28

спільно із доктором ф.-м. наук Ткачем В.М. та кандидатом ф.-м. наук

Вишняковим В.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи

доповідались на десяти міжнародних конференціях: IV International Young

Scientific Conference, Optics and High Technology Material Science, SPO 2005-

Kyiv, 2005; ІV міжнародній конференції «Фазовые превращения и прочность

кристалов» ,Чорноголовка, 2006; V міжнародній конференції “Фазовые

превращения и прочность кристаллов”, Чорноголовка, 2008; VІ міжнародній

конференції “Фазовые превращения и прочность кристаллов”, Чорноголовка,

2010; VІI міжнародній конференції “Фазовые превращения и прочность

кристаллов”, Чорноголовка, 2012; Міжнародній конференції «Украина –

Россия – Сколково. Единое инновационное пространство», Київ, 2013;

International conference «Sintering 2014», Dresden, 2014; VIII International Young

Scientists Conference, Optics& Hugh Technology Material Science SPO 2014,

Kyiv, 2014; Конференції молодих вчених з фізики напівпровідників,

Лашкарьовські читання, Київ, 2015; 58th Annual Conference of Society of

Vacuum Coaters, Santa Clara, April 25–30, 2015; International conference NANO

2016, Lviv, 2016; European Commission funded International Workshop “Materials

resistant to extreme conditions for future energy systems” 12-14 June 2017, Kyiv.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в двадцяти

шести статтях та шістнадцяти тезах міжнародних конференцій, найвагоміші 7

з яких наведено в авторефераті.

Загальнівисновки

Основниммеханізмомзростанняенергіїруйнуваннякерамічного

матеріалупридодаваннізерендругоїфазиєзатримкатріщининаграниці

передречовиноюізвищиммодулемЮнгаСтруктурнаоптимізація

механічниххарактеристиктугоплавкоїкерамікиполягаєувведеннів

дрібнодисперснужорсткуматрицюякомогабільшоїкількостікрупних

мкмвисокомодульнихзеренабо–обм’якихсубмікронних

включеньграфітучиграфітоподібногонітридуборуДосягненняоптимальних

структурнихпараметрівдозволитьподвоїтитріщиностійкістьматричноїфази

Реакціївпорошковихсумішахтапризводятьдоутвореннятугоплавкихфазтапри

температурах–℃щоєістотнонижчимизаїхнітемператури

плавленняОстаннєзумовиломожливістьформуваннядрібнодисперсної

структуригарячепресованихматеріаліввідповіднихсистемізвмістом

нанозерендиборидутитанутакарбідуборудо

Екзотермічнеперетвореннялегкоплавкихречовиннатугоплавкі

супроводжуєтьсязначнимдозменшеннямоб’ємуякепризводитьдо

формуваннявторинноїпоруватостіперешкоджаючиодержаннюмонолітної

керамікипритемпературахзавершеннявзаємодіїОднакнаявністьпроміжних

розплавівтанапочаткупроцесуразомізпідвищеноюмобільністю

реакційноїшихтизумовлюєінтенсифікаціюущільненнятадозволяє

використовуватиметодикурідкофазногореакційногосинтезудлястворення

компактнихкерамічнихкомпозитівсистемВСта

втемпературномуінтервалі℃℃протягом–

хвилин

Структуракерамічногокомпозиційногоматеріалутипу

дрібнодисперснаматриця–крупневисокомодульневключенняможебути

створенашляхомгарячогопресуванняреакційноїсумішіізнеобхідним

вмістомінертноївисокомодульноїфазизавиконаннянаступнихумов



температурагарячогопресуваннякомпозитумаєперевищуватитемператури

плавленняреагентівадіабатичнатемпературавідповідноїекзотермічної

реакціїмаєперевищуватитемпературуплавленняінертноїфазизметою

оплавленняповерхневогошарувключеньпідчасущільненняшихтижоден

зпродуктівочікуваноїреакціїнеповиненспівпадатиізречовиноюінертних

включеньЗастосуванняданогопідходудозволилосинтезувати

композиційнийматеріалнаосновікрупних–мкмзеренв

дрібнодисперснійматриціскладущоміститьнанорозмірнічастки

карбідуборуТріщиностійкістьодержаноїкерамікидосягаєМПа‧мщо

майжевдвічіперевищуєвідповіднухарактеристикуокремихкомпонентів

Останнєпояснюєтьсязатримкоютріщининависокомодульнихвключеннях

диборидутитанутавмежахпохибкивідповідаєзначеннюрозрахованомуза

допомогоюзапропонованоївроботітеоретичноїмоделі

Субмікронніграфітовівключенняможутьбутивведенівжорстку

керамічнуматрицюзадопомогоюекзотермічноїреакціїміжВСтакарбідами

перехіднихметаліврезультатомякоїєформування

диборидувідповідногометалутавиділеннявільноговуглецювформіграфіту

Показанощореакціяпочинаєтьсяпритемпературі℃таістотно

прискорюєтьсяпри℃зарахунокінтенсивноїсублімаціїатомівборуз

поверхніВС

ЕкспериментальнедослідженнякінетикитамеханізмівреакціїміжТіС

таВСпоказалощонакопиченнясублімованихатомівборувповерхневих

шарахкарбідутитануспричинюєвиникненняпластівчастихвключеньТіВ

Рістцихпластівцівзумовлюєвиникненнямікронапруженьрозтягувсередині

кристалівТіСтапризводитьдовідколюваннясубмікроннихчастиноквід

материнськогозерназабезпечуючидоступсублімованогоборудонових

поверхонькарбідуАтомивуглецювивільненіпротягомописуваного

процесуформуютьсубмікронніграфітовіпластівціякіпокращують

тріщиностійкістьматеріалів



Описанареакціявідбуваєтьсябездилатометричногоефекту

інтенсифікуєущільненняшихтитадозволяєотримативисокоякісні

ГПаП‧м

тугоплавкітемператураплавленнядо℃

гетеромодульнікерамікисистемтаіз

структуроютипувисокомодульнаматриця–субмікронніграфітовівключення

притемпературах–℃татисковіМПапротягомхвилин