

PACS numbers: 61.05.cp, 61.43.Gt, 68.37.Lp, 81.05.Je, 81.07.Wx, 81.20.Wk

## Механохімічна синтеза нанопорошків боридосиліцидних композицій

І. В. Кудь, Л. І. Єременко, Л. А. Крушинська, Д. П. Зяткевич,  
О. Б. Згалат-Лозинський, Р. В. Литвин, О. В. Мисливченко

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,  
вул. Кржижановського, 3,  
03142 Київ, Україна*

Представлено експериментальні результати вивчення механосинтези композиційного порошку системи  $\text{TiB}_2\text{-MoSi}_2$  в широкій концентраційній області з вмістом 20–60 мас.%  $\text{MoSi}_2$ . Показано, що при механосинтезі багатокомпонентних реакційних сумішей ( $\text{Ti} + \text{B} + \text{Mo} + \text{Si}$ ) одержати двофазний композиційний порошок  $\text{TiB}_2\text{-MoSi}_2$  в області концентрацій 40–80 мас.%  $\text{TiB}_2$  неможливо, і кінцевим продуктом взаємодії є суміш фаз: твердий розчин  $(\text{Ti}, \text{Mo})\text{B}_2$ ,  $\text{Mo}_3\text{Si}$ ,  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{MoB}_2$ . Для реакційної суміші ( $\text{Ti} + \text{B} + \text{MoSi}_2$ ) двофазний композиційний порошок ( $\text{TiB}_2$  і  $\text{MoSi}_2$ ) утворюється за 30 хв. при співвідношенні маси куль до маси порошку 10:1. Результати математичного моделювання розподілу контактів між порошковими частинками реакційних сумішей добре погоджуються з експериментальними результатами механосинтези.

Experimental results of an investigation of the mechanochemical synthesis of composite powder of the  $\text{TiB}_2\text{-MoSi}_2$  system in a wide concentration range with a  $\text{MoSi}_2$  content of 20–60 mass.% are presented. As shown, it is impossible to obtain a two-phase  $\text{TiB}_2\text{-MoSi}_2$  composite powder during mechanochemical synthesis of multicomponent ( $\text{Ti} + \text{B} + \text{Mo} + \text{Si}$ ) reaction mixtures in the concentration range 40–80 mass.%  $\text{TiB}_2$ , and the final product is a mixture of the following phases: the solid solution  $(\text{Ti}, \text{Mo})\text{B}_2$ ,  $\text{Mo}_3\text{Si}$ ,  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{MoB}_2$ . For the ( $\text{Ti} + \text{B} + \text{MoSi}_2$ ) reaction mixture, a two-phase composite powder ( $\text{TiB}_2$  and  $\text{MoSi}_2$ ) forms within 30 min at the ball-to-powder mass ratio 10:1. The results of mathematical modelling of the distribution of contacts between powder particles of the reaction mixtures agree well with the experimental results of mechanochemical synthesis.

Представлены экспериментальные результаты изучения механосинтеза композиционного порошка системы  $\text{TiB}_2\text{-MoSi}_2$  в широкой концентрационной области с содержанием 20–60 масс.%  $\text{MoSi}_2$ . Показано, что при механосинтезе многокомпонентных реакционных смесей ( $\text{Ti} + \text{B} +$

+ Mo + Si) получить двухфазный композиционный порошок  $TiB_2$ - $MoSi_2$  в области концентраций 40–80 масс.%  $TiB_2$  невозможно, и конечным продуктом взаимодействия является смесь фаз: твердый раствор  $(Ti, Mo)B_2$ ,  $Mo_3Si$ ,  $Mo_5Si_3$ ,  $MoB_2$ . Для реакционной смеси  $(Ti + B + MoSi_2)$  двухфазный композиционный порошок ( $TiB_2$  и  $MoSi_2$ ), образуется за 30 мин при соотношении массы шаров к массе порошка 10:1. Результаты математического моделирования распределения контактов между порошковыми частичками реакционной смеси хорошо согласуются с экспериментальными результатами механосинтеза.

**Ключові слова:** механосинтеза, композиційні порошки, борид титану, дисиліцид молібдену, контакти, математичне моделювання.

**Key words:** mechano-synthesis, composite powders, titanium boride, molybdenum disilicide, contacts, mathematical modelling.

**Ключевые слова:** механосинтез, композиционные порошки, борид титана, дисилицид молибдена, контакты, математическое моделирование.

*(Отримано 6 грудня 2019 р.)*

## 1. ВСТУП

Бориди та силіциди перехідних металів посідають особливе місце серед сучасних високотемпературних конструкційних матеріалів, призначених для роботи в умовах високих температур, абразивного та гідроабразивного зношування в агресивних середовищах. Широке коло стандартних і потенційних застосувань боридів перехідних металів визначають, насамперед, їхні високі температура топлення, твердість, механічна міцність, стійкість до термоудару, корозійна стійкість, хемічна інертність, електро- та теплопровідність [1, 2]. Силіциди перехідних металів, окрім високих температур топлення, механічних властивостей, термостійкості, мають надзвичайно високу стійкість до окиснення завдяки утворенню непроникного самозалікованого шару діоксиду кремнію на цих матеріалах за високих температур [3, 4]. У складі композиційної кераміки на основі боридів перехідних металів вони поліпшують її консолідацію, сприяють одержанню більшої щільності продуктів після спікання, а також пониженню температури спікання, тим самим запобігаючи росту зерна [5, 6].

Останнім часом особливої актуальності набувають дослідження методів одержання порошків тяжкотопких сполук у нанорозмірному стані, які уможливають одержувати матеріали з підвищеними властивостями та навіть відмінними від властивостей таких же матеріалів у мікронному стані.

Наші дослідження в області механосинтези тяжкотопких спо-

лук уможливили встановити особливості механізму утворення як диборидів, так і дисиліцидів. Дибориди металів IV та V груп (Ti, Zr, V, Nb) і дисиліциди металів V періоду незалежно від групи (Zr, Nb, Mo) утворюються за механізмом механічно стимульованої реакції (МСР) типу самопоширюваної високотемпературної синтези (СВС). Для решти перехідних металів формування сполук відбувається за механізмом твердофазної дифузії (ТД), і одержаний продукт потребує подальшого низькотемпературного відпалу у вакуумі в інтервалі 600–800°C. Аналіза одержаних даних свідчить, що механосинтеза за режимом МСР притаманна тільки сполукам із високим екзоэффектом хемічної реакції. При вивченні стадійності процесів твердофазної взаємодії в складних системах, що мають місце при механосинтезі, показано, що фазовий склад кінцевого продукту (тверді розчини або композиційні матеріали) залежить від області концентрації на діаграмі стану, якій відповідає склад суміші [7–11].

Метою даної роботи є дослідження механосинтези композиційних порошків системи  $TiB_2$ – $MoSi_2$  з широкою областю концентрації.

## 2. МАТЕРІЯЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Механосинтезу композиційних порошків  $TiB_2$ – $MoSi_2$  із вмістом 20–60 мас.%  $MoSi_2$  здійснювали в планетарному млині АІР-0,015 в середовищі аргону при співвідношенні маси куль до маси порошку (СКП) 10:1 та 20:1 протягом 30–60 хв. Як вихідні компоненти використовували порошки Ti, B, Mo і Si. Продукти механосинтези оцінювали за результатами рентгенофазової (РФА), електронно-мікроскопічної та фотонно-кореляційної спектроскопічної (PCS) аналіз.

Різні рівні екзотермічності реакції утворення  $TiB_2$  та  $MoSi_2$  визначають величини  $T_{адіяб.} = \Delta H_{298} / C_{298}$ , де  $\Delta H_{298}$  — ентальпія утворення,  $C_{298}$  — теплота утворення сполук [10]. Розраховані нами значення  $T_{адіяб.}$  для  $TiB_2$  і  $MoSi_2$  складають 7232 К і 1863 К відповідно. Це свідчить про те, що утворення  $TiB_2$  та  $MoSi_2$  в процесі механосинтези перебігає за механізмом МСР. Можна припустити, що теплова енергія «вибуху» в процесі утворення  $TiB_2$  за рахунок постійного перемішування реакційної суміші (Ti + B + Mo + Si) залучить у фронт реакції весь її об'єм.

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

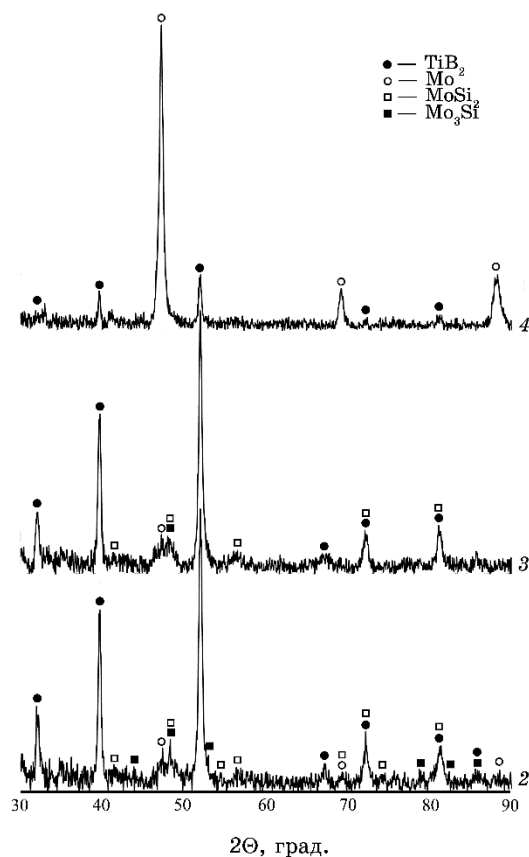
В таблиці 1 представлено дані РФА продуктів механосинтези. Механосинтеза  $TiB_2$  та  $MoSi_2$  за раніше встановленим нами ре-

**ТАБЛИЦЯ 1.** Результати РФА після механосинтези реакційної суміші (Ti + V + Mo + Si).<sup>1</sup>

Реакційна суміш, розрахована на склад, мас.%	Режими механосинтези		Фазовий склад	Періоди ґратниці фази TiB <sub>2</sub> , нм
	СКП	Час оброблення, хв.		
TiB <sub>2</sub>	10:1	30	TiB <sub>2</sub>	$a = 0,3029$ $c = 0,3227$
MoSi <sub>2</sub>	10:1	60	$\alpha$ -MoSi <sub>2</sub> , Mo <sub>слід.</sub>	—
		30	TiB <sub>2</sub> , Mo <sub>3</sub> Si, Mo	—
<i>Суміш 1</i>	10:1	60	TiB <sub>2</sub> , Mo <sub>3</sub> Si, Mo <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	—
80 TiB <sub>2</sub> -20 MoSi <sub>2</sub>	20:1	30	TiB <sub>2</sub> , Mo <sub>3</sub> Si, Mo <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> , Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	$a = 0,3039$ $c = 0,3234$
<i>Суміш 2</i>	20:1	30	TiB <sub>2</sub> , $\beta$ -MoSi <sub>2</sub> , Mo <sub>3</sub> Si, Mo	$a = 0,3043$ $c = 0,3231$
60 TiB <sub>2</sub> -40 MoSi <sub>2</sub>	20:1	30	TiB <sub>2</sub> , Mo, $\beta$ -MoSi <sub>2</sub> , Mo <sub>3</sub> Si	$a = 0,3044$ $c = 0,3230$
<i>Суміш 3</i>	20:1	30	Ti, Mo, TiB <sub>2</sub>	$a = 0,3044$ $c = 0,3235$
50 TiB <sub>2</sub> -50 MoSi <sub>2</sub>	20:1	30		
<i>Суміш 4</i>	20:1	30		
40 TiB <sub>2</sub> -60 MoSi <sub>2</sub>	20:1	30		

жимом [1, 11] уможливила одержати нанодисперсний порошок. Технологічні параметри механосинтези вищезгаданих сполук, які є основними фазами композиційного матеріалу, брали до уваги для відпрацювання режимів одержання матеріалу складу 80 мас.% TiB<sub>2</sub>-20 мас.% MoSi<sub>2</sub>. Було встановлено, що навіть при збільшенні СКП 20:1 одержати двофазний продукт не вдалося. Склад кінцевого продукту є сумішшю фаз: TiB<sub>2</sub>, Mo<sub>3</sub>Si, Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> і Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. Основна фаза — TiB<sub>2</sub>, судячи по змінах періодів ґратниці, є твердим розчином (Ti,Mo)B<sub>2</sub>. В процесі механосинтези тривалості індукційного періоду утворення сполук значно відрізняються (для TiB<sub>2</sub> він складає 10–15 хв. [1], для MoSi<sub>2</sub> — 60–90 хв. [7]). Фаза TiB<sub>2</sub>, що утворюється в перші 15 хв. синтезу за рахунок високої твердості (28–34 ГПа) [2] при довготривалому обробленні, приводить до намелу заліза (за 30 хв. — 1,31 мас.%). Беручи до уваги, що намел заліза є небажаним, нами вибрано оптимальний режим механосинтези: СКП 20:1 за тривалості у 30 хв.

Згідно з даними РФА продуктів механосинтези реакційних сумішей різного складу (суміші 2–4), показано, що для всіх реакційних сумішей одержати двофазний продукт не вдалося; однак спостерігаються зміни як фазового складу, так і їх кількісного перерозподілу (рис. 1). Для всіх сумішей утворюється твердий розчин (Ti,Mo)B<sub>2</sub>, про що свідчить зміна періодів ґратниці. У ви-



**Рис. 1.** Дифрактограми продуктів механосинтези (СКП 20:1, 30 хв.) реакційних сумішей  $\text{TiB}_2$ -40 мас.%  $\text{MoSi}_2$  (2),  $\text{TiB}_2$ -50 мас.%  $\text{MoSi}_2$  (3) і  $\text{TiB}_2$ -60 мас.%  $\text{MoSi}_2$  (4).<sup>2</sup>

падку сумішей 2 та 3 фіксується утворення фази  $\beta$ - $\text{MoSi}_2$ . Відсутність піків кремнію на дифрактограмах продуктів механосинтези пов'язана з його диспергуванням, деформацією кристалічної ґратниці та переходом у рентгеноаморфний стан, що підтверджено даними просвітлювальної електронної мікроскопії [11].

Аналіза одержаних результатів уможливорює зробити висновок, що утворення  $\text{TiB}_2$  здійснюється за механізмом МСР, де тривалість першого етапу (індукційного періоду), протягом якого система досягає критичного стану до «вибуху», складає 10–15 хв. (в умовах експерименту). Другий етап, — «вибух», — продовжується декілька секунд, а третій, — розповсюдження теплового фронту реакції на весь об'єм, — може займати до 5–20 хв. [12]. В нашому випадку при технологічних параметрах механосинтези (СКП 20:1 і тривалості у 30 хв.) на третьому етапі тепла енергія «вибуху»

гаситься за рахунок втрати тепла на присутніх вихідних елементах і розмельних тілах, і швидкість фронту горіння істотно зменшується. Це приводить до неможливості досягнення критичного стану системи Mo–Si для здійснення реакції за механізмом МСР у «вибуховому» режимі й утворення фази MoSi<sub>2</sub>. Як було показано нами раніше [7], індукційний період для утворення MoSi<sub>2</sub> складає 90 хв.

В процесі механосинтези одержати двофазний порошок композиційного матеріалу TiB<sub>2</sub>–MoSi<sub>2</sub> з простих елементів у широкій області концентрацій неможливо, і кінцеві продукти потребують низькотемпературного гомогенізувального відпалу.

На наш погляд, у випадку, коли складові композиційного матеріалу мають різний рівень екзотермічності реакції їхнього утворення, доцільно, як вихідні компоненти реакційної суміші, використовувати синтезовану сполуку із меншим значенням  $T_{\text{адіб.}}$  (в нашому випадку MoSi<sub>2</sub>). Для підтвердження цього проведено механосинтезу композиційного матеріалу складу TiB<sub>2</sub>–20 мас.% MoSi<sub>2</sub>, де в реакційній суміші, окрім титану та бору, присутній попередньо механосинтезований порошок MoSi<sub>2</sub>. Дані представлено в табл. 2.

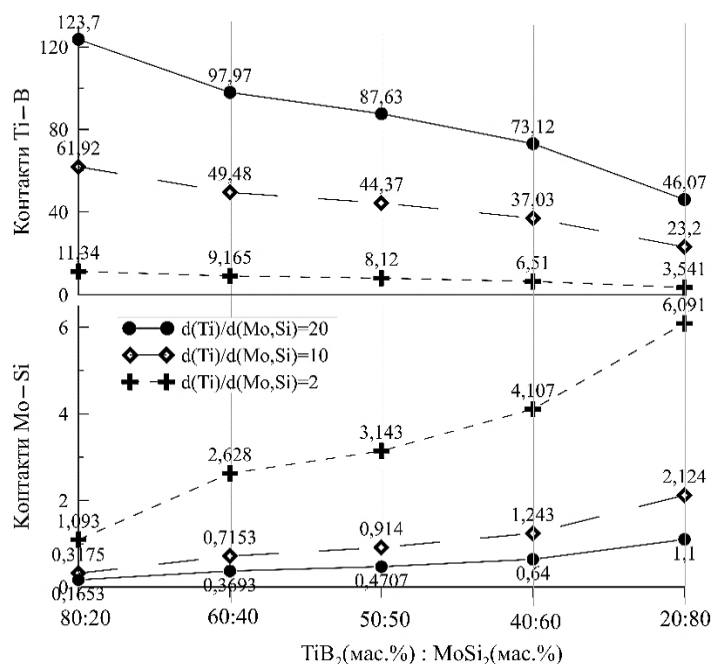
Дані РФА свідчать про те, що продуктом механосинтези (СКП 10:1, 15 хв.) є Ti, α-MoSi<sub>2</sub>, β-MoSi<sub>2</sub> та TiB<sub>2</sub>. Можна припустити, що завдяки присутності нанодисперсного порошку MoSi<sub>2</sub> має місце ізоляція крупнозернистого порошку титану, що приводить до сповільнення утворення TiB<sub>2</sub>, і тому в продуктах механосинтези фіксується титан. В той же час, за рахунок механоактивації нанопорошку дисиліциду молібдену відбувається часткове поліморфне перетворення α-MoSi<sub>2</sub> в метастабільну фазу β-MoSi<sub>2</sub>. Подальше збільшення часу механооброблення до 30 хв. приводить до повного формування фази TiB<sub>2</sub>. Присутність у кінцевому продукті метастабільної фази β-MoSi<sub>2</sub> та слідів нижчих силіцидів підтверджує, на наш погляд, повне завершення поліморфного перетворення α-MoSi<sub>2</sub> → β-MoSi<sub>2</sub> та незначний розпад метастабільної фази β-MoSi<sub>2</sub> [13]. РФА даних підтверджує, що при механосинтезі (СКП 10:1, 30 хв.) одержано двофазний композиційний порошок системи TiB<sub>2</sub>–MoSi<sub>2</sub>.

Неможливість одержання двофазного продукту для сумішей 1–4 можна пояснити з урахуванням об'ємної долі кожного елемента вихідних компонент, а саме, щільності та кількості. Для оцінки взаємодії компонент реакційної суміші виконано моделювання розподілу контактів між частинками порошку в широкій області концентрацій.

На рисунку 2 представлено розрахунок розподілу контактів у системі Ti–B–Mo–Si для різних співвідношень складу та розмірів частинок титану, молібдену та кремнію в реакційних сумішах,

ТАБЛИЦЯ 2. Результати РФА після механосинтезу реакційної суміші (Ti + B + MoSi<sub>2</sub>).<sup>3</sup>

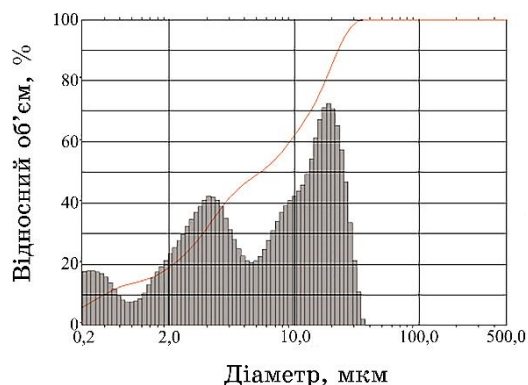
Реакційна суміш, розрахована на склад, мас.%	Режими механосинтези		Фазовий склад	Періоди ґратниці фази TiB <sub>2</sub> , нм
	СКП	Час оброблення, хв.		
80 TiB <sub>2</sub> -20 MoSi <sub>2</sub> 10:1		15	Ti, α-MoSi <sub>2</sub> , β-MoSi <sub>2</sub> , TiB <sub>2</sub>	a = 0,3028 c = 0,3227
		30	TiB <sub>2</sub> , β-MoSi <sub>2</sub> , Mo <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> сл., Mo <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> сл.	a = 0,3029 c = 0,3228

Рис. 2. Розподіл контактів в системі Ti-B-Mo-Si для різних співвідношень складу і розмірів частинок титану, молібдену та кремнію.<sup>4</sup>

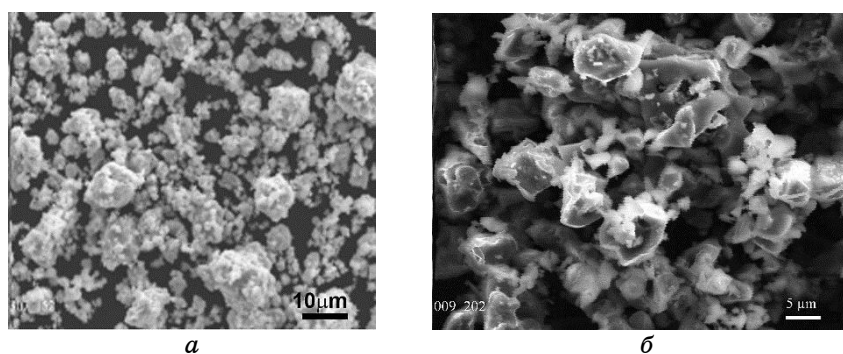
що наглядно демонструє кардинальну відміну вмісту складових Ti та B від вмісту Mo та Si.

Таким чином, у полідисперсній суміші порошків розраховане число контактів у реакційній парі Ti-B значно переважає значення для пари Mo-Si за умови  $d(\text{Ti})/d(\text{Mo,Si}) \approx 20$ . З точки зору внутрішньої геометрії системи взаємодія компонент у реакційній парі Mo-Si є недостатньою для синтезу MoSi<sub>2</sub>.

За даними аналізатора CILAS 990 Liquid механосинтезований



**Рис. 3.** Розподіл розміру частинок порошків, одержаних при механосинтезі  $\text{TiB}_2$ -20 мас.%  $\text{MoSi}_2$ .<sup>5</sup>



**Рис. 4.** Мікрофотографії частинок порошку композиційного матеріалу  $\text{TiB}_2$ -20 мас.%  $\text{MoSi}_2$  за різних збільшень.<sup>6</sup>

порошок  $\text{TiB}_2$ -20 мас.%  $\text{MoSi}_2$  відноситься до зразків з полімодальним розподілом частинок за розмірами, середній розмір яких складає  $\cong 9$  мкм (рис. 3).

Мікрофотографії порошку (рис. 4, а) вказують, що дані середнього розміру відповідають розміру агломератів. При вищому збільшенні (рис. 4, б) чітко видно, що агломерати складаються із дрібніших частинок.

#### 4. ВИСНОВКИ

Дослідження механосинтези нанопорошків композиційного матеріалу в системі  $\text{TiB}_2$ - $\text{MoSi}_2$ , де кожна складова відноситься до тяжкотопкої сполуки з високою екзотермічністю реакції її утворення, показали, що для одержання двофазного продукту доці-



льно, як одну з компонент реакційної суміші, використовувати готову сполуку  $\text{MoSi}_2$  з меншим рівнем екзотермічності. Механосинтезою реакційних сумішей вихідних компонент ( $\text{Ti} + \text{V} + \text{Mo} + \text{Si}$ ) одержати двофазний композиційний порошок  $\text{TiB}_2\text{-MoSi}_2$  в області концентрацій 40–80 мас.%  $\text{TiB}_2$  неможливо, а продуктом взаємодії є суміш фаз: твердий розчин  $(\text{Ti}, \text{Mo})\text{B}_2$ ,  $\text{Mo}_3\text{Si}$ ,  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{MoB}_2$ . Для реакційної суміші  $\text{Ti} + \text{V} + \text{MoSi}_2$  двофазний композиційний порошок ( $\text{TiB}_2$  і  $\text{MoSi}_2$ ), утворюється впродовж 30 хв. при СКП 10:1.

Розрахунок розподілу контактів між частинками порошків  $\text{Ti}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Mo}$  та  $\text{Si}$  виявив недостатню середню кількість контактів між частинками молібдену та кремнію, що заважає перебігу реакції синтезу  $\text{MoSi}_2$ . Для суміші із окремо механосинтезованим нанорозмірним порошком  $\text{MoSi}_2$  має місце потрапляння його на поверхню частинок титану і бору та блокування контактів між ними, за рахунок чого середня кількість контактів типу  $\text{Ti-V}$  знижується на третину. Результати математичного моделювання розподілу контактів між порошковими частинками реакційних сумішей добре узгоджуються з експериментальними результатами механосинтезу.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Г. Н. Макаренко, Л. А. Крушинская, И. И. Тимофеева, В. Е. Мацера, М. А. Васильковская, И. В. Уварова, *Порошковая металлургия*, **53**, № 9–10: 24 (2014).
2. Т. И. Серебрякова, В. А. Неронов, П. Д. Пешев, *Высокотемпературные бориды* (Москва: Металлургия: 1991).
3. J. Xu, S. Jiang, and Y. Wang, *ACS Appl. Mater. Inter.*, **2**, No. 1: 301 (2010).
4. M. Khail, M. Beaudhuin, B. Villeroy, D. Ravot, and R. Viennois, *J. Alloys Compd.*, **662**: 150 (2016).
5. Г. Н. Макаренко, Л. А. Крушинская, И. И. Тимофеева, М. А. Васильковская, В. Е. Мацера, Д. П. Зяткевич, В. К. Медюх, Р. М. Медюх, В. Ф. Лабунец, И. В. Уварова, *Порошковая металлургия*, **56**, № 9–10: 3 (2017).
6. T. S. R. Ch. Murthy, B. Basu, R. Balasubramaniam, A. K. Suri, C. Subramanian, and R. K. Fotedar, *J. Am. Ceram. Soc.*, **89**, No. 1: 131 (2006).
7. I. Kud, L. Ieremenko, L. Likhoded et al., *Am. J. Mater. Sci.*, **2**, No. 6: 202 (2012).
8. B. K. Yen, *J. Appl. Phys.*, **89**, No. 2: 1477 (2001).
9. B. K. Yen, T. Aizawa, and J. Kihara, *Mater. Sci. Eng.*, **A220**, Nos. 1–2: 8 (1996).
10. Z. Munir and V. Anselmi-Tamburini, *Mater. Sci. Rep.*, **3**: 277 (1989).
11. І. В. Кудь, Л. І. Єременко, Л. С. Лиходід, М. А. Васильківська, Д. П. Зяткевич, *Порошкова металлургия*, **58**, № 3–4: 22 (2019).
12. G. B. Schaffer and P. G. McCormick, *Scr. Metall.*, **23**, No. 6: 835 (1989).
13. C. Gras, F. Charlot, E. Gaffet, F. Bernard, and J. C. Niepce, *Acta Mater.*,

47, No. 7: 2113 (1999).

## REFERENCES

1. G. N. Makarenko, L. A. Krushinskaya, I. I. Timofeeva, V. E. Matsera, M. A. Vasil'kivska, and I. V. Uvarova, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **53**, Nos. 9–10: 514 (2015).
2. T. I. Serebryakova, V. A. Neronov, and P. D. Peshev, *Vysokotemperaturnyye Boridy* (Moscow: Metallurgiya: 1991) (in Russian).
3. J. Xu, S. Jiang, and Y. Wang, *ACS Appl Mater. Inter.*, **2**, No. 1: 301 (2010).
4. M. Khail, M. Beaudhuin, B. Villeroy, D. Ravot, and R. Viennois, *J. Alloys Compd.*, **662**: 150 (2016).
5. G. N. Makarenko, L. A. Krushinskaya, I. I. Timofeeva, M. A. Vasil'kovskaya, V. E. Matsera, D. P. Zyatkevich, V. K. Medyukh, R. M. Medyukh, V. F. Labunets, and I. V. Uvarova, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **56**, Nos. 9–10: 487 (2017).
6. T. S. R. Ch. Murthy, B. Basu, R. Balasubramaniam, A. K. Suri, C. Subramanian, and R. K. Fotedar, *J. Am. Ceram. Soc.*, **89**, No. 1: 131 (2006).
7. I. Kud, L. Ieremenko, L. Likhoded et al., *Am. J. Mater. Sci.*, **2**, No. 6: 202 (2012).
8. B. K. Yen, *J. Appl. Phys.*, **89**, No. 2: 1477 (2001).
9. B. K. Yen, T. Aizawa, and J. Kihara, *Mater. Sci. Eng.*, **A220**, Nos. 1–2: 8 (1996).
10. Z. Munir and V. Anselmi-Tamburini, *Mater. Sci. Rep.*, **3**: 277 (1989).
11. I. V. Kud', L. I. Ieremenko, L. S. Lykhodid, M. A. Vasylykivska, D. P. Zyatkevych, and I. V. Uvarova, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **58**, Nos. 3–4: 140 (2019).
12. G. B. Schaffer and P. G. McCormick, *Scr. Metall.*, **23**, No. 6: 835 (1989).
13. C. Gras, F. Charlot, E. Gaffet, F. Bernard, and J. C. Niepce, *Acta Mater.*, **47**, No. 7: 2113 (1999).

---

*I. M. Frantsevych Institute for Problems of Materials Science, N.A.S. of Ukraine,  
3, Krzhyzhanovs'kyi Str.,  
UA-03142 Kyiv, Ukraine*

<sup>1</sup> **TABLE 1.** Results of an XRD analysis after mechanosynthesis of the (Ti + B + Mo + Si) reaction mixture.

<sup>2</sup> **Fig. 1.** X-ray diffraction patterns of products of mechanosynthesis (BPR 20:1, 30 min) of TiB<sub>2</sub>-40 mass.% MoSi<sub>2</sub> (2), TiB<sub>2</sub>-50 mass.% MoSi<sub>2</sub> (3), and TiB<sub>2</sub>-60 mass.% MoSi<sub>2</sub> (4) reaction mixtures.

<sup>3</sup> **TABLE 2.** Results of an XRD analysis after mechanical synthesis of the (Ti + B + MoSi<sub>2</sub>) reaction mixture.

<sup>4</sup> **Fig. 2.** Distribution of contacts in the Ti–B–Mo–Si system for different ratios of compositions and sizes of the titanium, molybdenum, and silicon particles.

<sup>5</sup> **Fig. 3.** Distribution of powder particles obtained during mechanosynthesis of TiB<sub>2</sub>-20 mass.% MoSi<sub>2</sub>.

<sup>6</sup> **Fig. 4.** Micrographs of particles of the TiB<sub>2</sub>-20 mass.% MoSi<sub>2</sub> composite material at different magnifications.