

УДК:542.54-061;546.281;54-055

**І.В. Кудь, М.А. Васильківська, Л.І. Єременко, Л.С. Лиходід, І.В. Уварова, Н.С. Зяткевич**  
*Інститут проблем матеріалознавства ім.І.М.Францевича НАНУ*  
**ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ СИЛІЦИДІВ ПЕРЕХІДНИХ МЕТАЛІВ ПРИ  
МЕХАНОСИНТЕЗИ**

*Вивчено особливості твердофазних реакцій, які мають місце в процесі високоенергетичної механообробки при одержанні нанорозмірних матеріалів на основі дисиліцидів перехідних металів IV–VI груп періодичної системи елементів з урахуванням електронної структури та термодинамічних характеристик компонентів. Показано, що відмінності у механізмах утворення дисиліцидів перехідних металів пов'язані з електронною будовою перехідного металу, хімічною природою тугоплавкої сполуки та величиною екзотермічного ефекту реакції.*

*Ключові слова:* силіциди, механосинтез, механізм утворення

**И.В. Кудь, М.А. Васильковская, Л.И. Еременко, Л.С. Лиходед, И.В. Уварова, Н.С. Зяткевич**  
**ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СИЛИЦИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ  
МЕХАНОСИНТЕЗЕ**

*Изучены особенности твердофазных реакций, имеющих место в процессе высокоэнергетической механообработки при получении наноразмерных материалов на основе дисилицидов переходных металлов IV–VI групп периодической системы элементов с учетом электронной структуры и термодинамических характеристик компонентов. Показано, что отличия в механизмах образования дисилицидов переходных металлов связаны с электронным строением переходного металла, химической природой тугоплавкого соединения и величиной экзотермического эффекта реакции.*

*Ключевые слова:* силіциди, механосинтез, механізм утворення

**I. Kud, M. Vasylykivska, L. Ieremenko, L. Lichodid, I. Uvarova, N. Zyatkevich**  
**PECULIARITIES OF FORMATION OF SILICIDES OF TRANSITION METALS AT  
MECHANOSYNTHESIS**

*Silicides of transition metals are obtained by direct synthesis via solid-state reactions between elements at high temperatures (1000–1400 C), and it is practically impossible to obtain nanosized powders by this method. However, in some highly exothermic systems, the formation of compounds by way of mechanically initiated reactions (MIR) similarly to ignition synthesis can occur. The mechanosynthesis method is attractive for obtaining nanopowders due to the high exothermicity level of reactions of formation of silicides of the IV–VI groups.*

*Features of solid-state reactions that occur in the process of high-energy mechanotreatment during preparation of nanosized materials based on disilicides of the IV–VI groups have been studied with regard for the electronic structure and thermodynamic characteristics of their components.*

*The performed investigation has shown that differences in the mechanisms of formation of disilicides of transition metals are connected with the electronic structure of transition metals, chemical nature of refractory compounds, and exothermic effect of reactions.*

*Keywords:* silicides, mechanosynthesis, mechanism of formation

Екстремальні умови експлуатації багатьох механізмів (високі температури та навантаження в агресивних середовищах) викликають необхідність розробки нових матеріалів з підвищеними властивостями. Особливе місце серед них займають силіциди перехідних металів завдяки сприятливим сполученням фізико-хімічних властивостей. Високі жаро- та термостійкості в окислюваному середовищі в області температур до 1800 °С та низькі значення питомого електроопору дають можливість використовувати їх як нагрівачі, термодатчики, захисні покриття різного функціонального призначення. Найчастіше для розробки жаростійких матеріалів використовуються силіциди молібдену, танталу, хрому, вольфраму та композиційні матеріали на їх основі [1-2].

Традиційно силіциди перехідних металів одержують прямим синтезом шляхом проходження твердофазних реакцій між вихідними елементами при високих температурах (1000-1400 °С). Але одержати таким чином дрібнозернистий і нанодисперсний стан порошків практично неможливо [3]. Останні десятиліття велика кількість наукових праць присвячена дослідженню одержання нанопорошків дисиліцидів перехідних металів методом механосинтезу [4-9].

Механосинтез полягає у високоенергетичній обробці порошкових сумішей, які використовуються для одержання різних сполук і сплавів, в планетарних млинах [9]. Ця обробка приводить до зменшення розмірів кристалітів та акумуляції дефектів частинок порошку, що надає додаткової енергії для всієї реакційної суміші (відповідно межфазної енергії або енергії деформації). Зниження бар'єру активації хімічної реакції та безперервна фрагментація приводять частинки суміші у контакт, що підтримує високо реакційні міжфазні зони та мінімізує залежність

кінетики від швидкості дифузії. Втім, у деяких високоекзотермічних системах може відбуватися спонтанне утворення сполук шляхом механічно-ініційованої самопоширеної реакції (МСР) подібно до синтезу горіння [10]. Завдяки високому рівню екзотермічності реакції утворення силіцидів перехідних металів IV–VI груп [1], метод механосинтезу є особливо привабливим для одержання їх нанопорошків.

Метою дослідження є вивчення особливостей твердофазних реакцій, які мають місце в процесі високоенергетичної механообробки при одержанні нанорозмірних матеріалів на основі дисиліцидів перехідних металів IV–VI груп з урахуванням електронної структури та термодинамічних характеристик компонентів.

Як вихідні компоненти при приготуванні реакційних сумішей для дослідження твердофазної взаємодії кремнію з перехідними металами IV–VI груп Періодичної системи елементів використовували порошки: кремнію марки «КЕР-1А1»; хрому марки «ЕРХБ»; молібдену марки «МПЧ»; вольфраму марки «ВЧДК»; цирконію; титану марки «ПТЕ»; танталу марки «ПА»; ніобію марки «ПНБ» і ванадію.

Реакційні суміші, розраховані на одержання дисиліцидів вищевказаних металів, для досягнення рівномірного розподілу компонентів піддавали змішуванню у планетарному млині «Pulverizette-6» в сталевому барабані зі швидкістю обертання 100 об/хв. протягом 2 год. у реверсному режимі в середовищі етилового спирту. Розмір частинок одержаних порошкових сумішей не перевищував 10 мкм.

Дослідження особливостей одержання дисиліцидів перехідних металів IV–VI груп Періодичної системи елементів проводили в планетарному млині «Pulverizette-6» (у сталевому барабані зі швидкістю обертання 400 об/хв. протягом 2–20 год.) та у високоенергетичному планетарному млині «АІР-0,015» (за швидкості обертання 548 об/хв. із прискоренням 25 g у середовищі аргону). Сталеві барабани та розмелювальні тіла-шари діаметром 10 мм з метою запобігання забрудненню одержаних продуктів матеріалом реактора попередньо піддавали шаржуванню кремнієм. Дослідження проводили, виходячи з енергонапруженості, яку корегували, змінюючи тривалість подрібнення: 90 хв. – у планетарному млині «АІР-0,015»; 2÷20 год. – у млині «Pulverizette-6». Співвідношення маси розмелювальних шарів та маси порошку реакційних сумішей було постійним для обох млинів і складало 10:1. В процесі експерименту постійно здійснювали температурний контроль барабанів: для «АІР-0,015» дискретно вимірювали температуру поверхні, а для «Pulverizette-6» визначали тиск і температуру барабану в процесі механообробки за допомогою системи GТM фірми Fritsch.

Контроль фазових перетворень у процесах високоенергетичної механічної обробки здійснювали методом рентгенівського аналізу. Рентгенівську зйомку проводили на дифрактометрі «ДРОН-3» з використанням фільтрованого кобальтового випромінювання. Точність вимірювання кутів складала  $\pm 0,05$  градусів. Розмір кристалітів порошку розраховували за формулою Шеррера.

**Дослідження механосинтезу дисиліцидів перехідних металів IV групи за високоенергетичної обробки у планетарних млинах різного типу.**

Перехідні метали IV групи належать до гексагональної сингонії просторової групи  $R\bar{6}3/mmc-D_{6h}^4$  типу Mg. Характерною їх особливістю є поліморфне перетворення гексагональної структури в кубічну  $Im\bar{3}m-O_h^9$  типу  $\alpha$ -Fe. При цьому, якщо для Ti і Zr таке перетворення має місце в області температури 900 °С, то для Hf – на 1000 °С вище [3]. Таким чином, можна вважати, що при механосинтезі і твердофазна взаємодія між вихідними компонентами (Me та Si) здійснюється за участі металевих порошків гексагональної структури.

Дані рентгенівського аналізу продуктів високоенергетичної механічної обробки реакційних сумішей Me–Si (Me–Ti, Zr, Hf) у планетарних млинах «АІР-0,015» та «Pulverizette-6» за однакового співвідношення мас порошку та розмелюваних тіл (1:10) представлено на рис. 1–3.

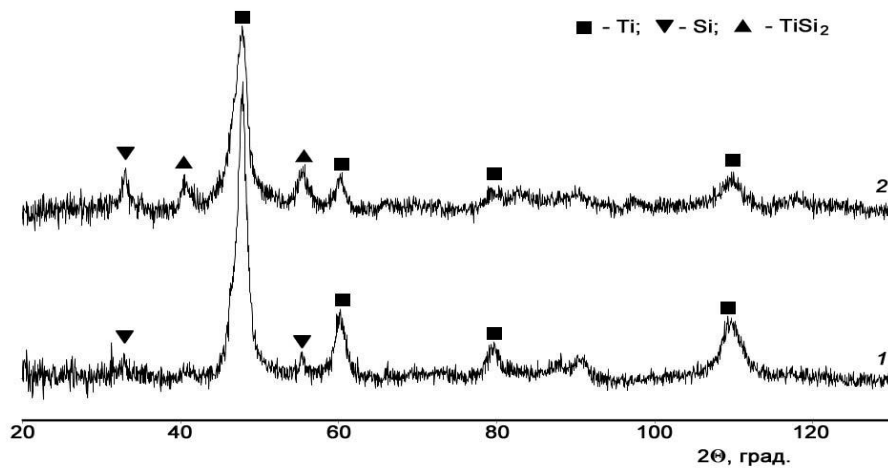


Рис. 1. Дифрактограми продуктів механічної обробки реакційної суміші Ti–Si у планетарних млинах «Pulverizette-6» (1) та «AIP-0,015» (2)

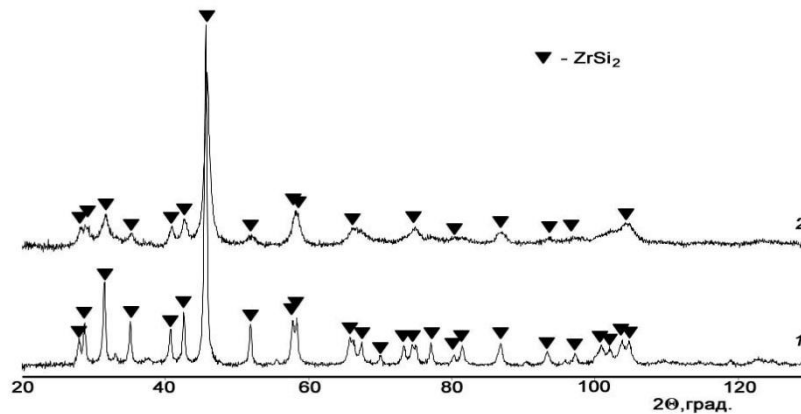


Рис. 2. Дифрактограми продуктів механічної обробки реакційної суміші Zr–Si у планетарних млинах «Pulverizette-6» (1) та «AIP-0,015» (2)

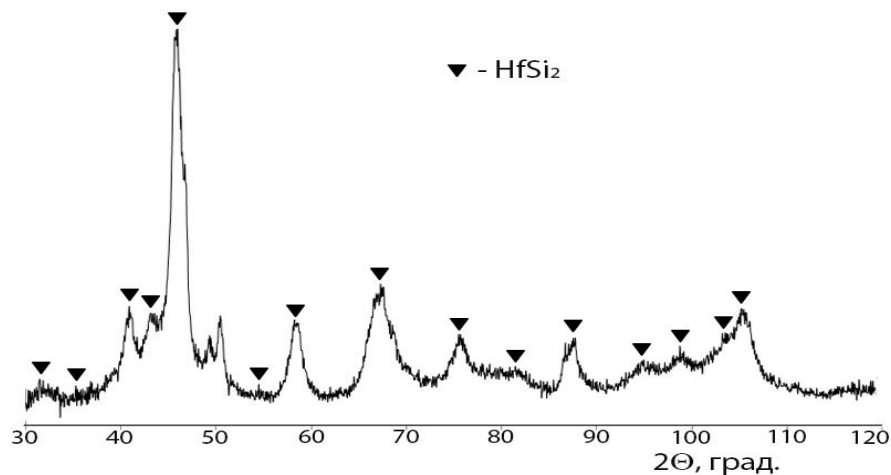
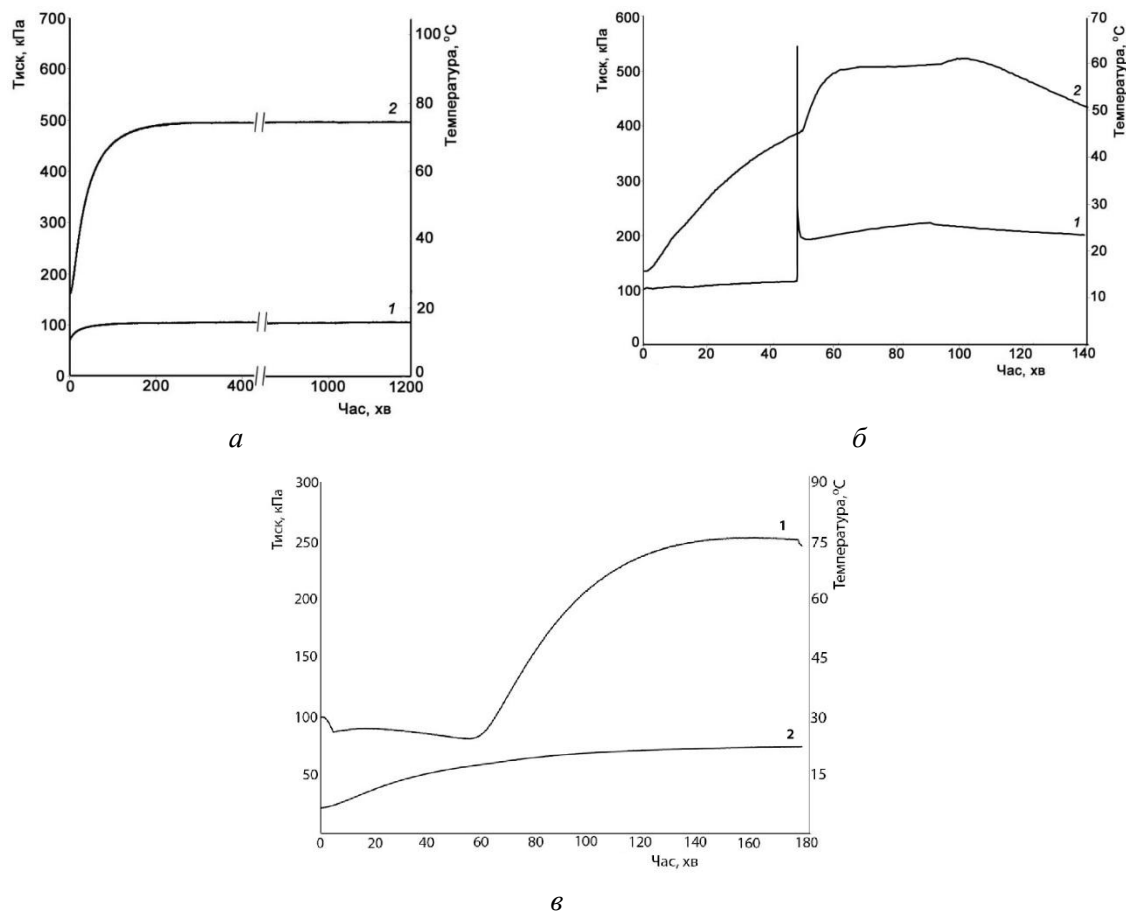


Рис. 3. Дифрактограми продуктів механічної обробки реакційної суміші Hf–Si у планетарному млині «Pulverizette-6»

Аналіз одержаних даних свідчить, що для реакційної суміші Ti–Si за механічної обробки в «Pulverizette-6» (400 об/хв.) протягом 20 год. не помічено різких змін величин тиску та температури у реакційному барабані (рис. 4 а). Згідно з даними рентгенівського аналізу, продуктом обробки є суміш титану (гексагональної модифікації) та кремнію. За високоенергетичної механічної обробки в «AIP-0,015» (548 об/хв.) в імпульсному режимі

протягом 90 хв. продуктом механосинтезу є вихідні компоненти та зародки дисиліциду титану ромбічної структури (рис. 1).



*a* – суміш Ti–Si; *б* – суміш Zr–Si, *в* – суміш Hf–Si;  
1 – тиск; 2 – температура

**Рис. 4. Залежність тиску та температури від часу в реакційному барабані при механічній обробці реакційних сумішей Ti–Si, Zr–Si та Hf–Si у планетарному млині «Pulverizette-6»**

Зовсім по іншому відбувається твердофазна взаємодія у випадку реакційної суміші Zr–Si. Вже на 50-й хвилині спостерігається різка зміна величин тиску та температури (рис. 4б) у реакційному барабані за механічної обробки в планетарному млині «Pulverizette-6». Рентгенівський аналіз свідчить про утворення дисиліциду цирконію (рис. 2). Відзначається відсутність вихідних компонентів. Механічна обробка у високоенергетичному млині «AIP-0,015» в імпульсному режимі призводить до аналогічного результату – продуктом реакції є гомогенний нанорозмірний порошок дисиліциду цирконію (ОКР – 25÷40 нм).

При механічній обробці суміші Hf–Si в планетарному млині «Pulverizette-6» на 60 хв. обробки тиск поступово підвищується (рис. 4в), що свідчить про початок взаємодії між гафнієм на кремнієм. Після 2 годин механообробки продукт складається з дисиліциду гафнію (рис. 3).

#### **Дослідження механосинтезу дисиліцидів перехідних металів V групи у процесі високоенергетичної обробки у планетарних млинах різного типу.**

Всі перехідні метали V групи належать до кубічної сингонії просторової групи  $Im\bar{3}m-O_h^9$  типу  $\alpha$ -Fe [3]. В результаті прямого синтезу у вакуумі в діапазоні температур 1300–1400 °C [1] утворюються дисиліциди гексагональної сингонії структурного типу  $CrSi_2$  просторової групи  $R\bar{6}_222-D_{6h}^4$ .

Дані рентгенівського аналізу продуктів високоенергетичної механічної обробки реакційних сумішей Me–Si (Me–V, Nb, Ta) у планетарних млинах «AIP-0,015» та «Pulverizette-6» за однакових співвідношень мас порошку та розмелюваних тіл (1:10) представлено на рис. 5-7.

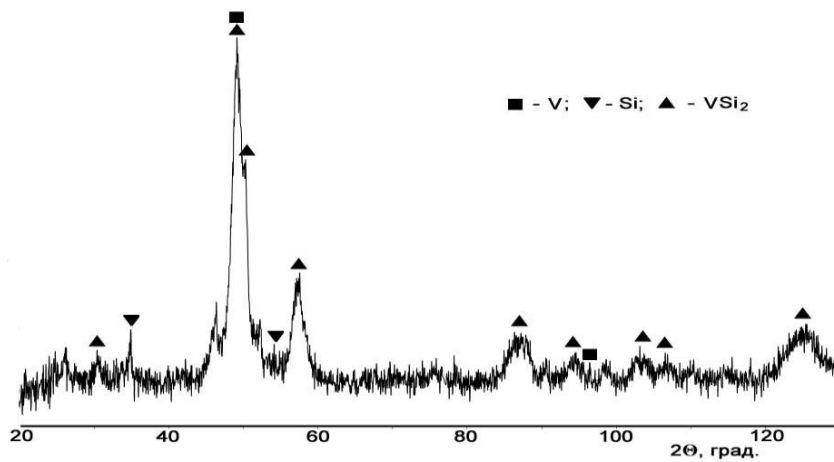


Рис. 5. Дифрактограма продуктів механічної обробки реакційної суміші V–Si у планетарному млині «Pulverizette-6»

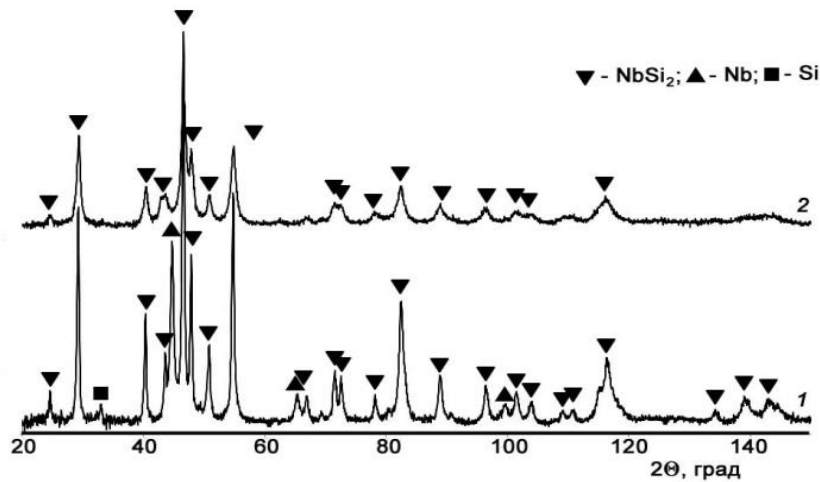


Рис. 6. Дифрактограми продуктів механообробки суміші Nb–Si у планетарних млинах «Pulverizette-6» (1) та «AIP-0,015» (2)

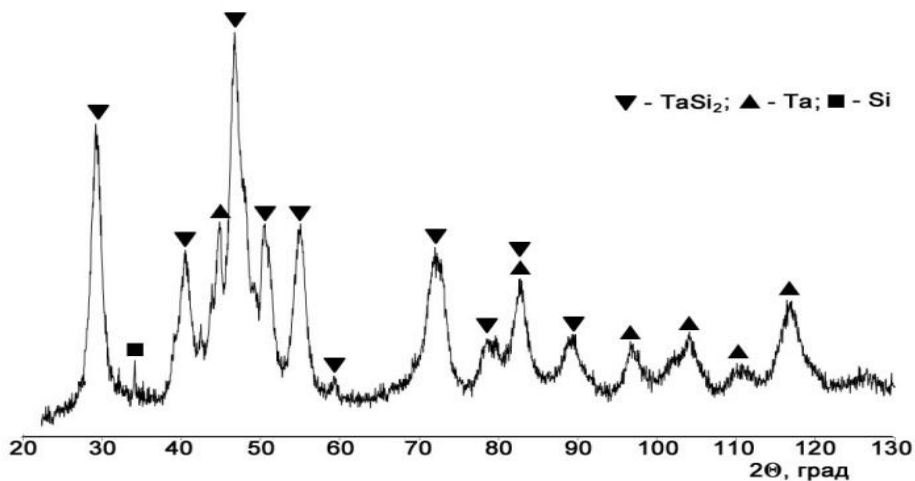
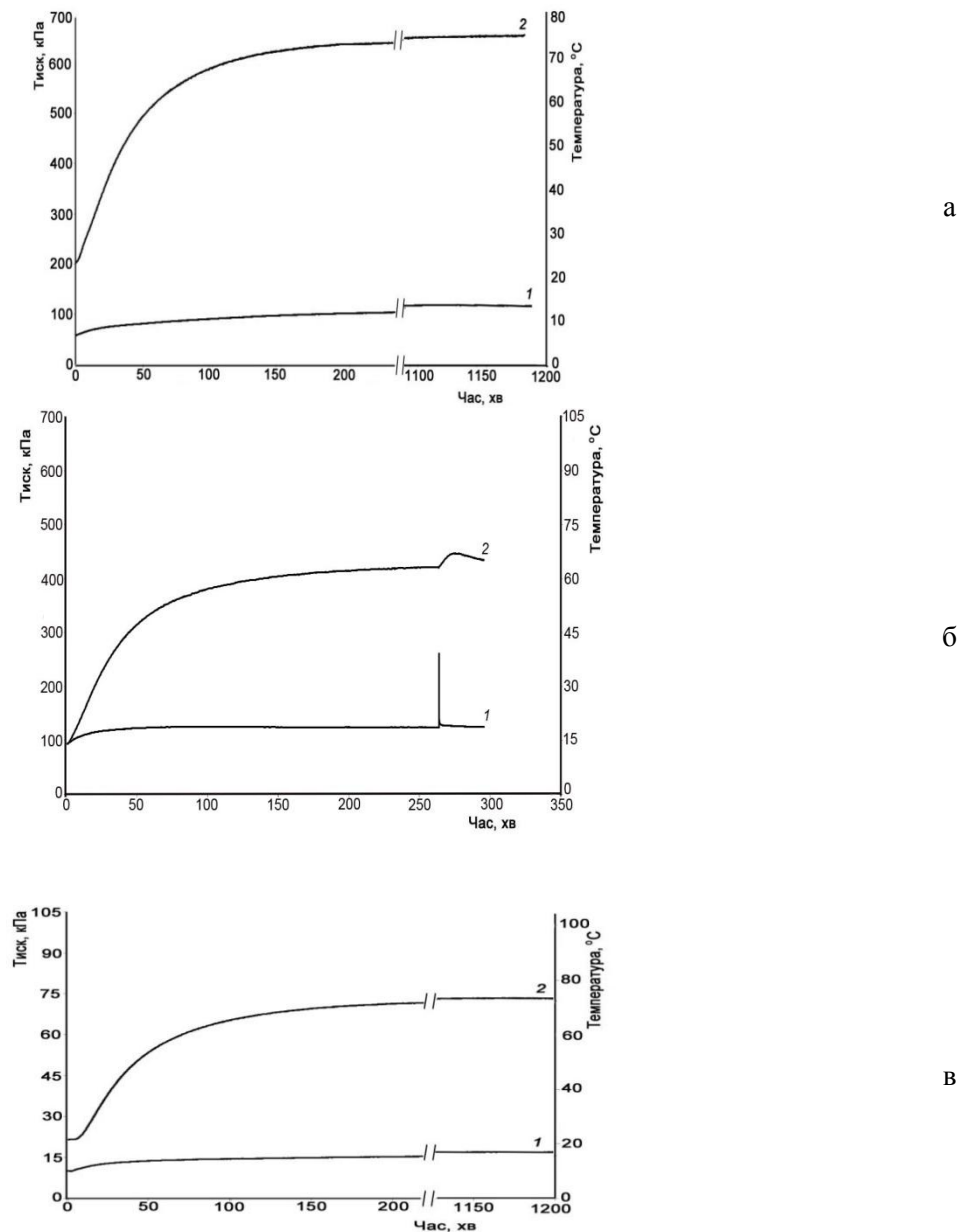


Рис. 7. Дифрактограма продуктів механічної обробки реакційної суміші Ta–Si у планетарному млині «Pulverizette-6»

Аналіз одержаних даних свідчить, що для реакційних сумішей V–Si й Ta–Si за механообробки у «Pulverizette-6» (400 об/хв.) не помічено ніяких різких змін величин тиску та температури в реакційному барабані (рис. 8).



*a* – суміш V–Si; *б* – суміш Nb–Si; *с* – суміш Ta–Si; 1 – тиск; 2 – температура

**Рис. 8. Залежність тиску та температури від часу перебування у реакційному барабані за механообробки сумішей у млині «Pulverizette-6»**

Однак, згідно з даними рентгенівського аналізу, під час механообробки мала місце твердофазна взаємодія, про що свідчить утворення дисиліцидів ( $VSi_2$  або  $TaSi_2$ ). Крім того, помічено присутність вихідних металів та кремнію. За високоенергетичної ж механообробки в «AIR-0,015» (548 об/хв.) в імпульсному режимі протягом 90 хв. одержано аналогічні результати.

Для суміші Nb–Si під час механообробки в «Pulverizette-6» твердофазна взаємодія носить вибуховий характер, як і у випадку реакційної суміші Zr–Si, про що свідчить різка зміна величин тиску та температури (рис. 8) на 263-й хвилині. Продуктом такої взаємодії є суміш дисиліциду ніобію з вихідними компонентами Nb, Si, інтенсивніша ж механообробка у високоенергетичному млині «AIR-0,015» в імпульсному режимі призводить до одержання гомогенного нанорозмірного порошку дисиліциду ніобію (ОКР –  $15 \div 35$  нм).

**Дослідження механосинтезу дисиліцидів перехідних металів VI групи у процесі високоенергетичної обробки в планетарних млинах різного типу.**

Всі перехідні метали VI групи належать до кубічної сингонії просторової групи  $Im\bar{3}m-O_h^9$  типу  $\alpha$ -Fe [3]. В результаті прямого синтезу з елементів у вакуумі за температури 1200 °C

утворюється дисиліцид хрому гексагональної сингонії структурного типу  $\text{CrSi}_2$  просторової групи  $\text{R}\bar{6}_222\text{-D}_{6h}^4$ , а за температури  $1100^\circ\text{C}$  – дисиліциди молібдену та вольфраму тетрагональної сингонії структурного типу  $\text{MoSi}_2$  просторової групи  $\text{I4}/\text{mmm}\text{-D}_{4h}^{14}$ . Крім того, слід відзначити, що для дисиліциду молібдену має місце поліморфне перетворення тетрагональної модифікації на гексагональну за температури  $1850^\circ\text{C}$ [1].

Аналіз одержаних експериментальних даних (фазовий склад продуктів високоенергетичної механообробки сумішей  $\text{Me-Si}$  ( $\text{Me-Cr, Mo, W}$ ) у млинах «AIP-0,015» та «Pulverizette-6» (рис. 9-11) і характер зміни величин тиску та температури залежно від часу обробки в реакційному барабані (рис. 12)) показав, що твердофазна взаємодія перехідних металів VI групи з кремнієм здійснюється за механізмом, аналогічним до притаманного металам V-ї групи.

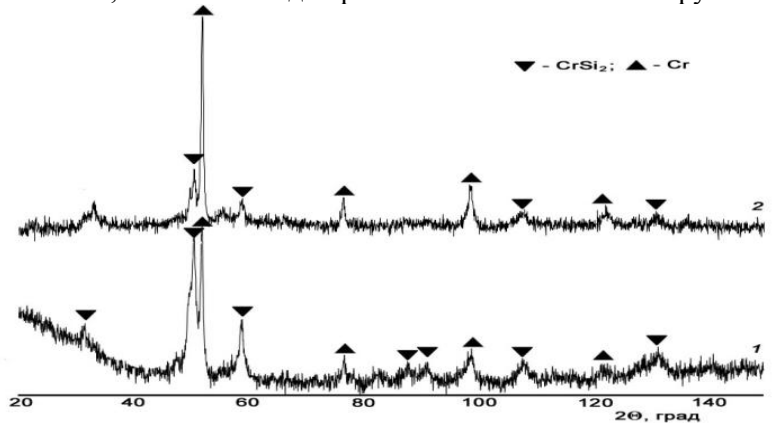


Рис. 9. Дифрактограма продуктів механообробки суміші  $\text{Cr-Si}$  у планетарних млинах «Pulverizette-6» (1) та «AIP-0,015» (2)

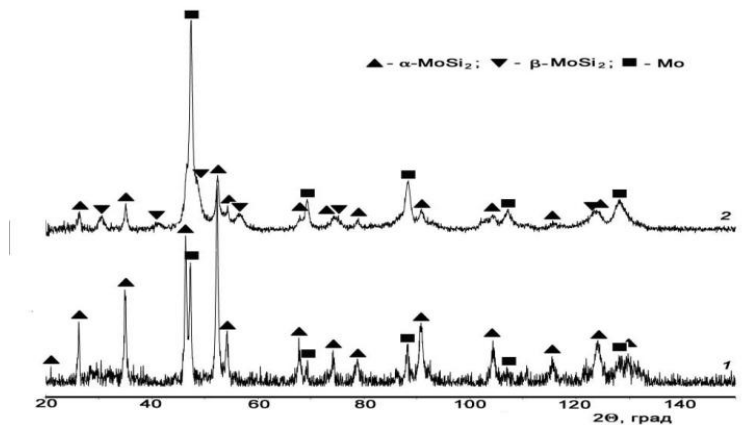


Рис. 10. Дифрактограма продуктів механообробки суміші  $\text{Mo-Si}$  у планетарних млинах «Pulverizette-6» (1) та «AIP-0,015» (2)

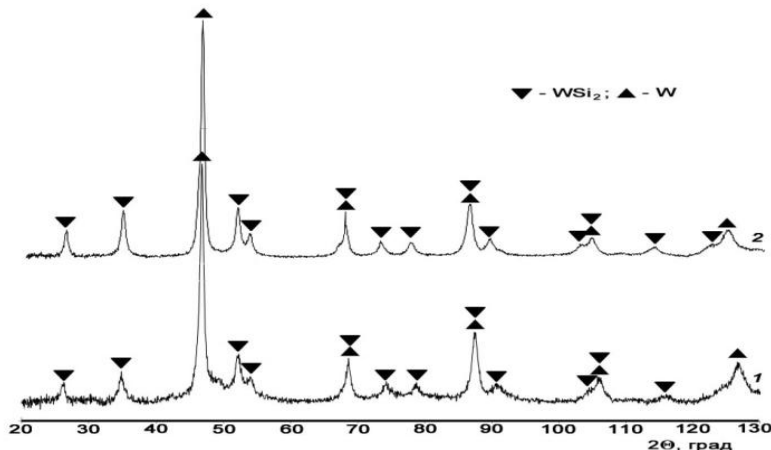
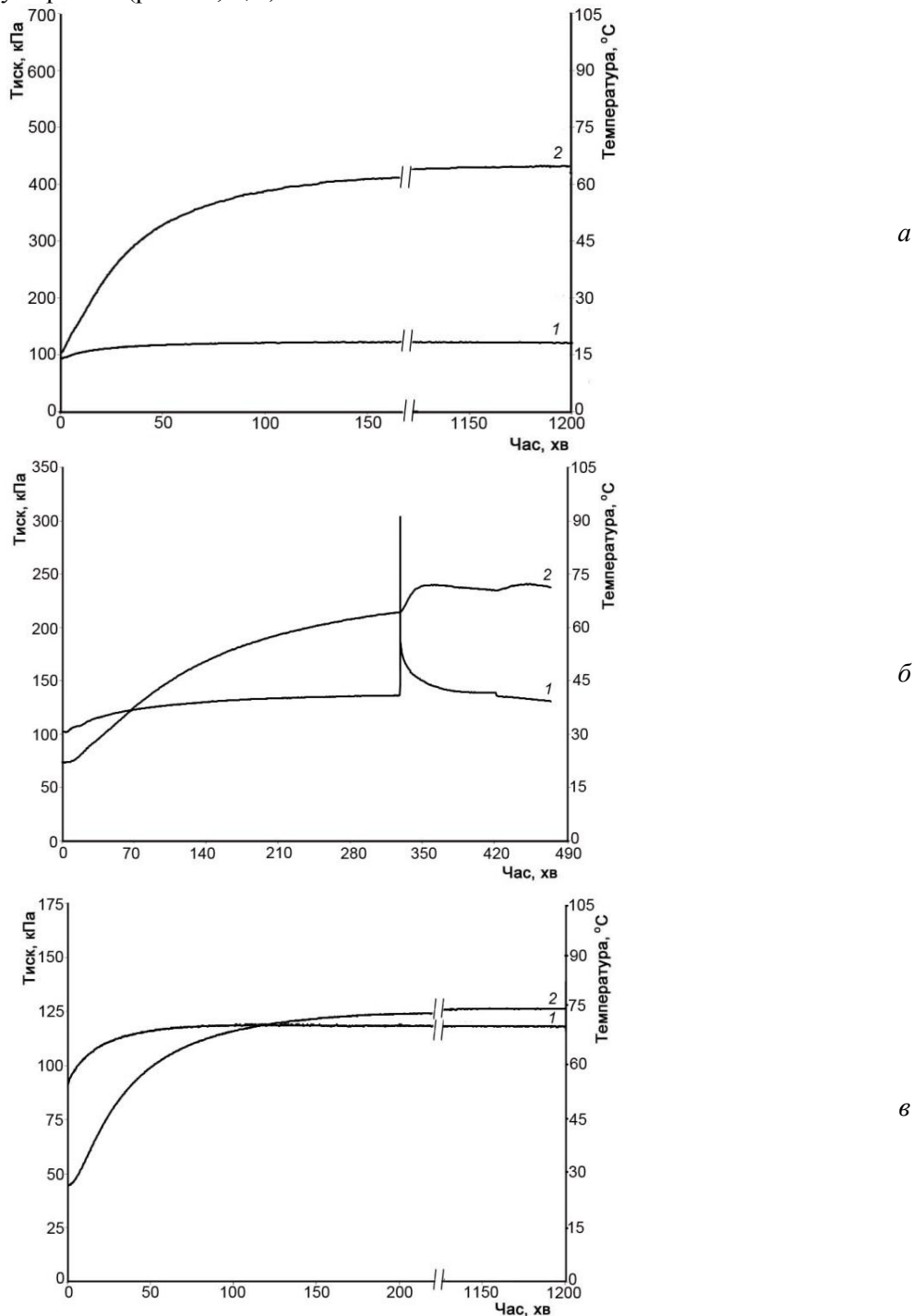


Рис. 11. Дифрактограма продуктів механообробки суміші  $\text{W-Si}$  у планетарних млинах «Pulverizette-6» (1) та «AIP-0,015» (2)

Згідно з одержаними даними, у випадку реакційної суміші Cr–Si та W–Si протягом 20 год. за механообробки у «Pulverizette-6» (400 об/хв.) не помічено жодних змін тиску та температури у реакційному барабані (рис. 12, а, в).



а – суміш Cr–Si; б– суміш Мо–Si; в– суміш W – Si; 1 – тиск; 2 – температура

Рис. 12. Залежність тиску та температури від часу перебування в реакційному барабані за механообробки сумішей у млині «Pulverizette-6»

За даними рентгенівського аналізу, продуктом механообробки є суміш дисиліцидів хрому або вольфраму та вихідних металів (рис. 9,11). Збільшення енергонапруженості обробки (у високоенергетичному млині «АІР-0,015» за 548 об/хв. в імпульсному режимі протягом 90 хв.) практично не призвело до істотної зміни складу продуктів взаємодії. Співвідношення утворених фаз дисиліцидів і вихідних металів склало ~40:60.

Для реакційної суміші Мо–Si твердофазна взаємодія за механообробки у «Pulverizette-6», судячи з характеру різкої зміни тиску та температури в реакційному барабані на 335-й хвилині



обробки (рис. 12б) здійснюється за механізмом, аналогічним до притаманного системам Zr–Si (рис. 4б) та Nb–Si (рис. 8б). Рентгенівський аналіз свідчить про утворення дисиліциду молібдену, крім того, наявна значна кількість молібдену (рис. 10, крива 1,2).

Твердофазна взаємодія за механообробки в млині «АІР-0,015» в імпульсному режимі протягом 90 хв. супроводжується утворенням дисиліциду молібдену в двох модифікаціях:  $\alpha$ -MoSi<sub>2</sub> (тетрагональна з ОКР на рівні 25÷40 нм);  $\beta$ -MoSi<sub>2</sub> (гексагональна, ОКР = 10÷15 нм) (рис. 10, крива 2). Крім того, у продуктах взаємодії наявний молібден.

Проведене дослідження показало, що формування дисиліцидів перехідних металів відбувається за різними механізмами: для систем Zr–Si, Hf–Si, Nb–Si та Mo–Si – за механізмом механічно стимульованої реакції (МСР) в режимі «псевдо-СВС», а для систем Ti–Si, V–Si, Ta–Si, Cr–Si й W–Si – твердофазної дифузії (ТД). Одержані експериментальні дані добре узгоджуються з результатами численних досліджень в області вивчення закономірностей утворення силіцидів перехідних металів у процесі механосинтезу [4-9]. Особливістю утворення дисиліцидів у режимі МСР є дуже короткий термін (практично миттєвий), а для утворених за механізмом ТД – характерна повільна взаємодія протягом тривалої механообробки.

Звертає на себе увагу те, що формування дисиліцидів за механізмом МСР має місце тільки для перехідних металів IV, V і VI груп Періодичної системи елементів, які належать до V періоду незалежно від кристалічної структури вихідного металу (Zr – гексагональна, Nb і Mo – кубічна) та утвореного дисиліциду: ZrSi<sub>2</sub> – ромбічна, NbSi<sub>2</sub> – гексагональна, MoSi<sub>2</sub> – тетрагональна і гексагональна. Можна вважати, що це пов'язано з електронною будовою атомів металів, зміною спектрів валентних електронів та збільшенням стабільності *d*-конфігурацій.

Крім того, слід відзначити різницю в терміні механообробки (індукційний період) до виникнення реакції в режимі «псевдо-СВС». Так, якщо для системи Zr–Si цей термін складає 50 хв., то для систем Nb–Si та Mo–Si – 270 та 335 хв. відповідно – що можна пояснити різницею у твердості металів ( $HV_{Zr} = 952$ ,  $HV_{Nb} = 1280$ ,  $HV_{Mo} = 1900$  МПа [1]), яка призводить до різного ступеню подрібнення. Це дозволяє припустити, що одним з основних чинників визначення механізму твердофазної взаємодії є електронна будова перехідного металу, яка й визначає весь спектр відповідних властивостей.

Виявлену різницю в механізмах утворення дисиліцидів перехідних металів можна пов'язати з екзотермічністю відповідних реакцій. Згідно з проведеними низкою авторів дослідженнями [4, 7, 8] механосинтезу дисиліцидів перехідних металів, утворення дисиліцидів за механізмом МСР подібне до синтезу горіння. Єдиною реакцією, яка відповідає за саморозповсюдження фронту в зоні хвилі горіння, є  $Me + 2Si = MeSi_2$ . Всі фазові перетворення проходять одночасно з основною хімічною реакцією менш як за 1 секунду. Температура горіння близька до адіабатичної, а проміжні фази у продуктах реакції відсутні. Існує граничне значення адіабатичної температури ( $T_{ад} = 1800$  К), нижче від якого утворення силіцидів проходить за механізмом твердофазної дифузії [4].

Часто замість адіабатичної температури використовують спрощену формулу  $\Delta H_{298}/\Delta C_{298}$  ( $\Delta H_{298}$  – теплота реакції,  $\Delta C_{298}$  – питома теплоємність її продукту), яка добре корелює з теоретично розрахованою адіабатичною температурою [8]. Розраховані нами значення  $T_{ад}$  представлено у таблиці. Одержані експериментальні дані добре узгоджуються з наведеними розрахунками у частині, що стосується механізмів утворення дисиліцидів перехідних металів (за винятком титану).

Таблиця 1

Механізми утворення дисиліцидів перехідних металів

Сполука	TiSi <sub>2</sub>	ZrSi <sub>2</sub>	HfSi <sub>2</sub>	VSi <sub>2</sub>	NbSi <sub>2</sub>	TaSi <sub>2</sub>	CrSi <sub>2</sub>	MoSi <sub>2</sub>	WSi <sub>2</sub>
$\Delta H_{298}/\Delta C_{298}$ , К	2190	2327	3396	1796	1943	1790	1572	1886	1458
Тип реакції	МСР	МСР	МСР	ТД	МСР	ТД	ТД	МСР	ТД

### Висновки.

1. Вивчено особливості синтезу дисиліцидів перехідних металів IV-VI груп періодичної системи елементів при механосинтезі.

2. Показано, що формування вказаних дисиліцидів відбувається за різними механізмами: для систем Zr-Si, Nb-Si, Hf-Si, Mo-Si - за механізмом МСР, а для систем Ti-Si, V-Si, Ta-Si, Cr-Si, W-Si - за механізмом твердофазної дифузії.
3. Механізм МСР притаманий для перехідних металів, які належать до V періоду, незалежно від кристалічної структури вихідного металу та структури утвореного силіциду.
4. Запропонована відмінність у механізмах утворення дисиліцидів перехідних металів пов'язана з електронною будовою перехідного металу, хімічною природою тугоплавкої сполуки та величиною екзотермічного ефекту реакції.

#### Список використаних джерел:

1. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений, справ.изд.подред.Косолаповой Т.Я. – М., Металлургия, 1986. –928 с.
2. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС. – М.: Мир, 1986.– 176с.
3. Самсонов Г. В. Силициды / Г. В. Самсонов, Л. А. Дворина, Б. М. Рудь. – М.: Металлургия, 1979. – 272 с.
4. Yen B. K. Self-Propagating Exothermic Reactions Between Silicon and Transition Metals of Groups IVA–VIA Induced by Mechanical Alloying // J. Appl. Phys.–2001. – Vol. 89, No. 2. – P. 1477–1483.
5. Yen B. K. X-ray Diffraction Study of Solid-State Formation of Metastable MoSi<sub>2</sub> and TiSi<sub>2</sub> During Mechanical Alloying / B. K. Yen // J. Appl. Phys.– 1997.– Vol. 81, No. 10. – P. 7061–7063.
6. Yen B. K. Reaction Synthesis of Refractory Disilicides by Mechanical Alloying and Shock Reactive Synthesis Techniques / B. K. Yen, T. Aizawa, J. Kihara, N. Sakakibara // Mater. Sci. Eng. –A. – Dec. 1997. – Vol. 239–240. – P. 515–521.
7. Maglia F. Combustion Synthesis of Mechanically Activated Powders in the Ta–Si System / F. Maglia, C. Milanese, U. Anselmi-Tamburini et al.// J. of Alloys and Compounds. – 2004. – Vol. 385, No. 1–2. – P. 269–275.
8. Maglia F. Combustion Synthesis of Mechanically Activated Powders in the Ti–Si System / F. Maglia, U. Anselmi-Tamburini, G. Cocco et al. // J. Mater. Res. – Apr. 2001. – Vol. 16, No.4. – P. 1074–1082.
9. Trapp J. Solid-State Reactions During High-Energy Milling of Mixed Powders / J. Trapp and B. Kieback // Acta Mater. – Jan. 2013. – Vol. 61, No. 1. – P. 310–320.
10. Ляхов Р.З., Талако Т.Ф., Григорьева Т.Ф. Влияние механоактивации на процессы фазо- и структурообразования при самораспространяющемся синтезе – Новосибирск: Параллель, 2008. – 2008 – 168с.

#### Рецензенти:

**Перекоп Анатолій Емельянович**, ст.научн.сотр. Інститута Металлофізики НАНУ, канд.физ.-мат. наук, ст.научн.сотр.

**Подчерняева Ирина Александровна**, ведучий научний співробітник Інститута проблем матеріалознавства НАНУ, доктор техн.наук, професор.

Стаття надійшла до редакції 04.05.2017