

## ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

PACSnumbers: 61.05.cp, 64.70.kd, 64.70.Nd, 75.30.Gw, 75.50.Cc, 75.50.Ww, 81.07.Bc

### Вплив вмісту титану на параметри взаємодії у системі $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x-\text{H}_2$ ( $x = 1,7; 0,95; 0,5; 0,2; 0,1$ )

І. І. Булик, М. В. Пилат

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,  
вул. Наукова, 5,  
79601, МСП, Львів, Україна*

Методами диференційної термічної та рентгенівської фазової аналіз досліджено фазові перетворення у системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x-\text{H}_2$  ( $x = 0,1, 0,2, 0,5, 0,95$  і  $1,7$ ) під час звичайного та солід-гідрування, диспропорціонування, десорбування, рекомбінування за тиску водню  $3,0\text{--}5,2$  МПа та температури до  $950^\circ\text{C}$ . Встановлено, що збільшення вмісту титану приводить до зростання стабільності феромагнетної фази зі структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ . При  $x = 0,1$  та  $0,2$  вихідна сполука диспропорціонує повністю на гідрид самарію та кобальт. За вмісту титану  $x = 0,5$  відбувається часткове диспропорціонування, а при  $x = 0,95$  і  $1,7$  фазові перетворення не відбуваються. Після рекомбінування за температури у  $850^\circ\text{C}$  у стопах із вмістом титану  $x = 0,1, 0,2$  та  $0,5$  виявлено фазу зі структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ , кобальт і сліди оксиду самарію.

**Ключові слова:** магнетні матеріали, титан, легування, гідрування, диспропорціонування, десорбування, рекомбінування, фазові перетворення.

Phase transformations in  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x-\text{H}_2$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.5, 0.95$  and  $1.7$ ) system are investigated by means of the differential thermal (DTA) and X-ray phase analyses during conventional and solid hydrogenation, disproportionation, desorption, recombination (HDDR) treatment under hydrogen pressure of  $3.0\text{--}5.2$  MPa and temperature up to  $950^\circ\text{C}$ . The increase of tita-

Corresponding author: Ihor Ivanovych Bulyk  
E-mail: bulyk@ipm.lviv.ua

*G. V. Karpenko Physical-Mechanical Institute, N.A.S. of Ukraine,  
5 Naukova Str., 79061 Lviv, Ukraine*

Please cite this article as: I. I. Bulyk and M. V. Pylyat, Influence of Titanium Content on Interaction Parameters in the  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x-\text{H}_2$  System ( $x = 1.7; 0.95; 0.5; 0.2; 0.1$ ), *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 5: 697–707 (2016) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.38.05.0697.

nium content leads to the increasing stability of initial ferromagnetic phase with  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ -type structure. At  $x = 0.1$  and  $0.2$ , the initial compound completely disproportionates into samarium hydride and cobalt. The partial disproportionation occurs at titanium content  $x = 0.5$ . They are found recombined  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ -type structure phase, cobalt and traces of samarium oxide after recombination at  $850^\circ\text{C}$  in alloys with  $x = 0.1, 0.2$  and  $0.5$ .

**Key words:** magnetic materials, titanium, alloying, hydrogenation, disproportionation, desorption, recombination, phase transformation.

Методами дифференціального термічного і рентгеновського фазового аналізу досліджені фазові превращення в системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x\text{-H}_2$  ( $x = 0,1, 0,2, 0,5, 0,95$  і  $1,7$ ) при обычном і солід-гідрированні, диспропорціонуванні, десорбції, рекомбінації під тиском водороду  $3,0\text{--}5,2$  МПа і температурі до  $950^\circ\text{C}$ . Установлено, що збільшення вмісту титану призводить до зростання стабільності ферромагнітної фази со структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ . При  $x = 0,1$  і  $0,2$  вихідне сполучення диспропорціонує повністю на гідрид самарія і кобальт. При вмісті титану  $x = 0,5$  відбувається лише часткове диспропорціонування, а при  $x = 0,95$  і  $1,7$  фазові превращення не відбуваються. Після рекомбінації при температурі  $850^\circ\text{C}$  в сплавах з вмістом титану  $x = 0,1, 0,2$  і  $0,5$  виявлена фаза со структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ , кобальт і сліди оксиду самарія.

**Ключевые слова:** магнітні матеріали, титан, легування, гідрирування, диспропорціонування, десорбція, рекомбінація, фазові превращення.

*(Отримано 13 жовтня 2014 р.; остаточн. варіант — 13 квітня 2015 р.)*

## 1. ВСТУП

Водневе оброблення ферромагнітних стопів, зокрема шляхом гідрування, диспропорціонування, десорбування, рекомбінування (ГДДР), є перспективним технологічним підходом для одержання магнетно анізотропних матеріалів з високодисперсною мікроструктурою [1]. На основі перших результатів впливу такого оброблення на фазовий склад та мікроструктуру стопів на основі  $\text{SmCo}_5$  зроблено висновок, що шляхом ГДДР мікроструктура здрібнюється до нанорозмірів [1]. Однак вона негомогенна і на окремих ділянках низько дисперсна [2]. Одним із шляхів гомогенізування мікроструктури є термічне оброблення. ГДДР, зокрема, його заключний етап (десорбування, рекомбінування — ДР), реалізують за підвищених температур. Це означає, що для гомогенізування стопів слід підвищити температуру або тривалість ДР. Однак це може спричинити ріст зерен мікроструктури і вихід їх розміру за верхню межу нанобласти ( $> 100$  нм). Без гомогенізації (продовження термічного впливу на матеріал) досягти найвищих магнітних властивостей немож-

ливо. Щоб гомогенізувати стопи, але уникнути росту зерен мікроструктури, запропоновано легувати їх третіми елементами. Вибір для легування випадає на ті метали, які сповільнюють ріст зерен, а їх кількість невелика для мінімізації негативного впливу на магнетні властивості.

Титан, для заміни частини кобальту в стопах  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , вибрано на основі даних про його вплив на особливості ГДДР у стопах на основі Лавесових фаз [3], де показано істотне сповільнення ініційованих воднем фазових перетворювань.

Мета роботи — оцінити вплив кількості титану в стопах  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  на умови ГДДР, зокрема, тиск водню, необхідний для диспропорціонування фази зі структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ .

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ

Стопи  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$ , де  $x = 1,7, 0,95, 0,5, 0,2$  і  $0,1$  ат. Ti/ф.од., або  $x = 8,9, 5,0, 2,6, 1,1$  та  $0,5$  ат. % Ti, одержали із шихти вихідних компонентів з чистотою не нижче 99,5% мас. в електродуговій печі в атмосфері аргону. Вміст самарію в шихті перевищував стехіометричний на 2% мас. Використовували диференційну термічну аналізу (ДТА) під час гідрування, диспропорціонування (ГД) та контролювали рівень вакууму в камері під час ДР [4]. Швидкість нагрівання в водні та вакуумі дорівнювала  $5^\circ\text{C}/\text{хв.}$ , швидкість охолодження — не контрольована (піч знімали з камери, камеру охолоджували на повітрі). Взаємодію у системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x\text{-H}_2$  досліджували за умов звичайного та солід ГДДР [5]. Найвищий початковий тиск водню дорівнював  $\cong 5$  МПа (тиск надлишковий), найвища температура —  $950^\circ\text{C}$ . Рентгенівську фазову аналізу (РФА) виконували за дифрактограмами, знятими на дифрактометрі ДРОН-2.0 ( $\text{FeK}_\alpha$ -випромінення). Фази ідентифікували за допомогою програми PowderCell [6], періоди кристалічних ґратниць фаз визначали за допомогою програми FullProf [7].

## 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

**Взаємодія з воднем стопу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{15,3}\text{Ti}_{1,7}$ .** У литому стопі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{15,3}\text{Ti}_{1,7}$  ідентифіковано фазу зі структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  (рис. 1, а, табл. 1).

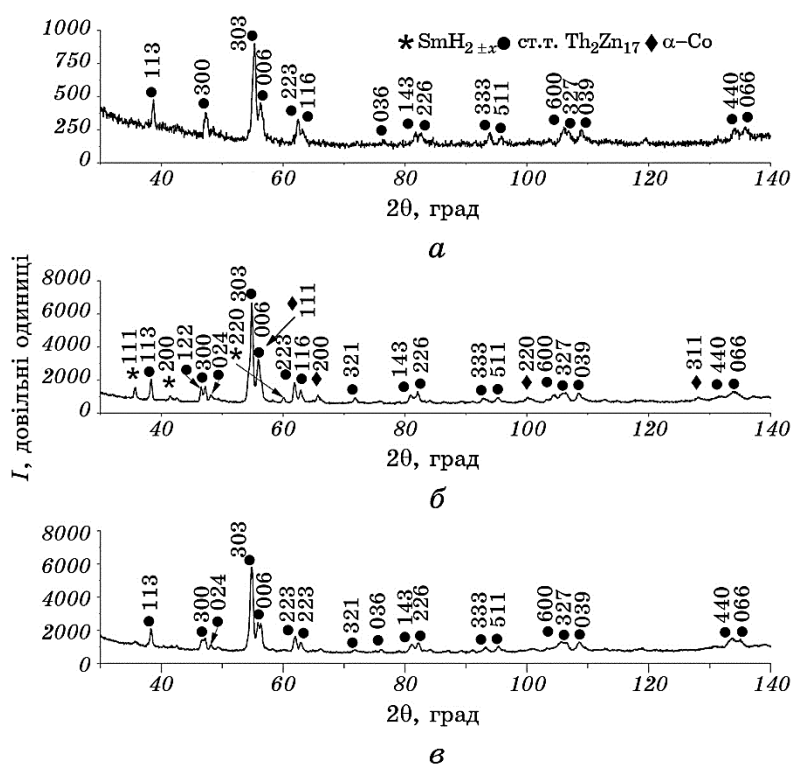
Для виявлення можливих термічних ефектів внаслідок взаємодії стопу з воднем під час нагрівання досліджено звичайне ГД під початковим тиском водню 3,0 МПа з нагріванням до температури  $950^\circ\text{C}$  (величину тиску в 3,0 МПа вибрано на основі даних про умови повного диспропорціонування в водні стопу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  [8]). На кривій залежності сигналу диференційної термопары від температури не виявлено жодних теплових ефектів. Тобто фазових перетворень немає

або вони перебігають повільно. За даними РФА виявлено фазу зі структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ , кобальт та сліди гідриду самарію (рис. 1, б, табл. 1).

Спів  $\text{Sm}_2\text{Co}_{15,3}\text{Ti}_{1,7}$  також не диспропорціонує за умов солід ГД під тиском водню 3,2 і 5,2 МПа за температури  $700^\circ\text{C}$  після взаємодії тривалістю 3 год. (рис. 1, в, табл. 1) (величину температури в  $700^\circ\text{C}$  під час солід ГД вибрано на основі даних [9]). Нагрів сполуки  $\text{Sm}_2\text{Co}_{15,3}\text{Ti}_{1,7}$  у водні завершується його гомогенізацією (порівняйте дифрактограми на рис. 1, а і в).

**Взаємодія з воднем сполуки  $\text{Sm}_2\text{Co}_{16,05}\text{Ti}_{0,95}$ .** В литому сполуці домінує фаза зі структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ , виявлено невелику кількість кобальту та сліди оксиду самарію (табл. 1).

Після нагрівання сполуки в водні під тиском 3 МПа до температури



**Рис. 1.** Дифрактограми сполуки  $\text{Sm}_2\text{Co}_{15,3}\text{Ti}_{1,7}$  в литому стані (а) та після нагрівання в водні: до  $950^\circ\text{C}$  під тиском 3,0 МПа (б) і до  $700^\circ\text{C}$  під тиском 3,2 МПа з витримкою 3 год. (в).

**Fig. 1.** XRD patterns of the  $\text{Sm}_2\text{Co}_{15,3}\text{Ti}_{1,7}$  alloy: as-cast (a); after heating at  $950^\circ\text{C}$  under hydrogen pressure of 3.0 MPa (b) and after heating at  $700^\circ\text{C}$  under hydrogen pressure of 3.2 MPa during 3 h. (c).

950°C за умов звичайного ГД методом РФА виявлено, крім фази зі структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  ( $\cong 70\%$  мас.) та кобальту, сліди гідриду самарію (табл. 1).

Стоп, оброблений у водні за умов солід ГД під тиском водню 3,2 МПа за температури 700°C тривалістю  $\tau = 3$  год., містить фазу зі структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ , кілька відсотків кобальту та сліди гідриду самарію (табл. 1).

**ТАБЛИЦЯ 1.** Умови взаємодії з воднем стопів  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$ ,  $x = 1,7, 0,95, 0,5, 0,2$  і  $0,1$ , її продукти та кристалографічні характеристики.

**TABLE 1.** Conditions of interaction between hydrogen and  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  alloys,  $x = 1.7, 0.95, 0.5, 0.2$  and  $0.1$ , its products and crystallographic characteristics.

Режим обробки				Фаза	Вміст фази, % мас.	Періоди ґратниць, Å	
ГД, ДР	$P_{\text{H}_2}$ , МПа, надл.	$T$ , °C	$\tau$ , год			$a$	$c$
1	2	3	4	5	6	7	8
				Вихідний $\text{Sm}_2\text{Co}_{15,29}\text{Ti}_{1,7}$	100	8,410(4)	12,347(1)
ГД	3,0	950	–	ст.т. * $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	85,9	8,450(1)	12,368(4)
				$\alpha\text{-Co}$	14,1	3,569(2)	–
				$\text{SmH}_{2\pm x}$	Сліди	–	–
Солід ГД	3,2	700	3	ст.т. $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	60,6	8,438(3)	12,350(7)
				$\alpha\text{-Co}$	39,4	3,584(4)	–
Солід ГД	5,2	700	3	ст.т. $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	100,0	8,435(4)	12,367(1)
				Вихідний $\text{Sm}_2\text{Co}_{16,05}\text{Ti}_{0,95}$	92,9	8,409(1)	12,273(1)
				$\alpha\text{-Co}$	7,1	3,571(2)	–
				$\beta\text{-Co}$	Сліди	–	–
				$\text{Sm}_2\text{O}_3$	Сліди	–	–
ГД	3,0	950	–	ст.т. $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	81,6	8,483(3)	12,279(8)
				$\alpha\text{-Co}$	18,5	3,563(5)	–
				$\text{SmH}_{2\pm x}$	Сліди	–	–
Солід ГД	3,2	700	3	ст.т. $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	93,5	8,431(3)	12,278(5)
				$\alpha\text{-Co}$	5,3	3,569(1)	–
				$\beta\text{-Co}$	Сліди	–	–
				$\text{SmH}_{2\pm x}$	1,2	5,427(4)	–
Солід ГД	5,2	700	3	ст.т. $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$	95,4	8,427(9)	12,272(9)
				$\alpha\text{-Co}$	4,6	3,570(6)	–
				$\beta\text{-Co}$	Сліди	–	–

Продовження Таблиці 1.

Continuation of Table 1.

1	2	3	4	5	6	7	8
				Sm <sub>2</sub> Co <sub>16,5</sub> Ti <sub>0,5</sub> ст.т. Th <sub>2</sub> Zn <sub>17</sub>	100	8,410(6)	12,248(8)
Солід ГД	3,0	700	3	ст.т. Th <sub>2</sub> Zn <sub>17</sub>	36,4	8,486(8)	12,226(5)
				α-Co	50,2	3,550(9)	–
				SmH <sub>2±x</sub>	13,4	5,406(8)	–
Солід ДР	Вакуум	850	–	ст.т. Th <sub>2</sub> Zn <sub>17</sub>	75,5	8,409(2)	12,242(1)
				α-Co	13,9	3,548(3)	–
				Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,6	10,932(3)	–
				Вихідний	100	8,404(9)	12,237(4)
				Sm <sub>2</sub> Co <sub>16,8</sub> Ti <sub>0,2</sub> ст.т. Th <sub>2</sub> Zn <sub>17</sub>	100	8,404(9)	12,237(4)
Солід ГД	3,0	700	3	α-Co	72,7	3,548(9)	–
				SmH <sub>2±x</sub>	27,3	5,406(8)	–
				ст.т. Th <sub>2</sub> Zn <sub>17</sub>	Сліди	–	–
Солід ДР	Вакуум	850	–	ст.т. Th <sub>2</sub> Zn <sub>17</sub>	85,2	8,405(4)	12,233(6)
				α-Co	12,7	3,547(7)	–
				Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,2	10,928(3)	–
				Вихідний	100	8,398(1)	12,233(5)
				Sm <sub>2</sub> Co <sub>16,9</sub> Ti <sub>0,1</sub> ст.т. Th <sub>2</sub> Zn <sub>17</sub>	100	8,398(1)	12,233(5)
Солід ГД	3,0	700	3	α-Co	81,3	3,547(2)	–
				SmH <sub>2±x</sub>	18,7	5,398(4)	–
Солід ДР	Вакуум	850	–	ст.т. Th <sub>2</sub> Zn <sub>17</sub>	80,7	8,402(1)	12,226(9)
				α-Co	16,9	3,545(7)	–
				Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,4	10,919(1)	–

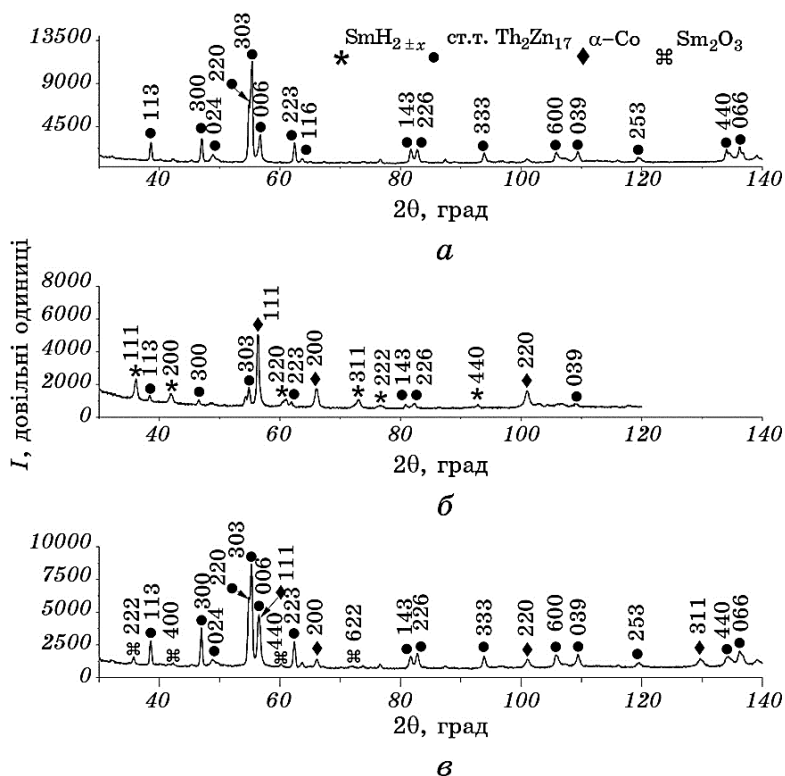
\* ст.т. — структурний тип.

З підвищенням тиску водню до 5,2 МПа, за температури у 700°C, тривалости взаємодії у 3 год., крім фази зі структурою типу Th<sub>2</sub>Zn<sub>17</sub>, виявлено сліди кобальту (табл. 1).

**Взаємодія з воднем стопу Sm<sub>2</sub>Co<sub>16,5</sub>Ti<sub>0,5</sub>.** За даними РФА литий стоп Sm<sub>2</sub>Co<sub>16,5</sub>Ti<sub>0,5</sub> є однофазним (рис. 2, а, табл. 1).

Після взаємодії стопу з воднем за умов солід ГД, під тиском водню 3,0 МПа з тривалістю взаємодії 3 год., більше половини фази зі структурою типу Th<sub>2</sub>Zn<sub>17</sub> розпадається на гідрид самарію та кобальт (рис. 2, б, табл. 1).

Нагрівання диспропорціонованого стопу Sm<sub>2</sub>Co<sub>16,5</sub>Ti<sub>0,5</sub> у вакуумі до температури 850°C спричиняє розпад гідриду самарію. Самарій взаємодіє з кобальтом і утворюється фаза зі структурою типу Th<sub>2</sub>Zn<sub>17</sub> (рис. 2, в, табл. 1). Крім того, стоп містить близько 15% мас. кобальту та сліди оксиду самарію.



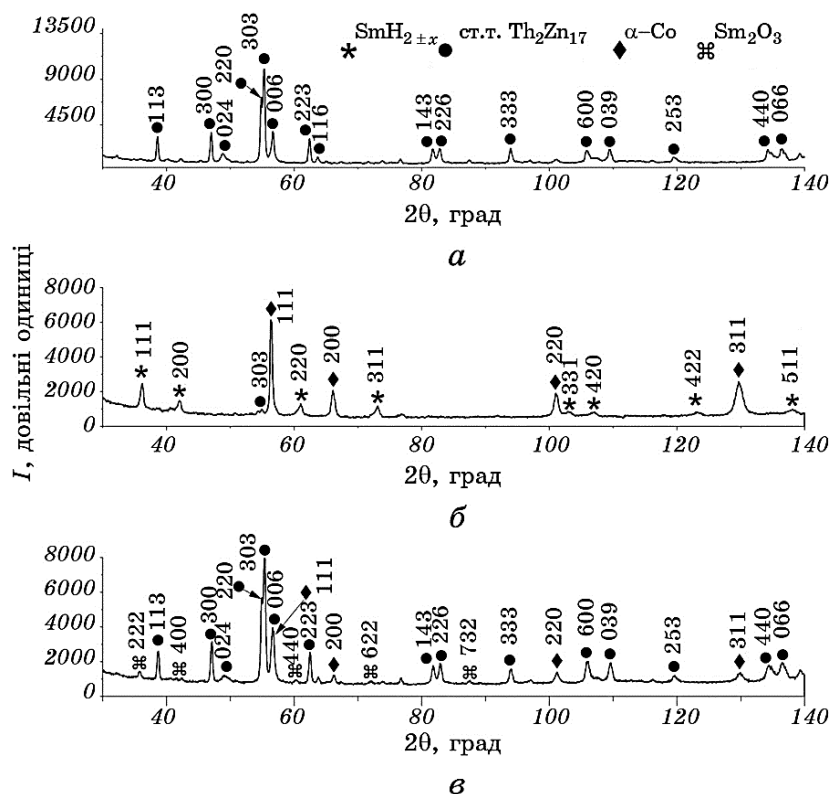
**Рис. 2.** Дифрактограми стопу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{16,5}\text{Ti}_{0,5}$ : в литому стані (а); після диспропорціонування у водні під тиском 3,0 МПа за температури 700°C, витримка 3 год. (б); після рекомбінування за температури 850°C (в).

**Fig. 2.** XRD patterns of the  $\text{Sm}_2\text{Co}_{16,5}\text{Ti}_{0,5}$  alloy: as-cast (a); after disproportionation under hydrogen pressure of 3.0 MPa at 700°C during 3 h (b); after recombination in vacuum at 850°C (c).

**Взаємодія з воднем стопу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{16,8}\text{Ti}_{0,2}$ .** Литий стоп  $\text{Sm}_2\text{Co}_{16,8}\text{Ti}_{0,2}$ , за даними РФА, є однофазним (рис. 3, а, табл. 1). Його взаємодія з воднем за умов солід ГД під тиском 3,0 МПа за температури 700°C тривалістю 3 год. завершується повним розпадом фази зі структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  на гідрид самарію та кобальт (рис. 3, б, табл. 1). Низькоінтенсивний пік на дифрактограмі під кутом  $\cong 55^\circ$  міг утворитися після відбиття від залишків вихідної фази.

Термічне оброблення продуктів диспропорціонування в вакуумі за температури 850°C завершується їх рекомбінуванням (рис. 3, в). Після ДР в складі стопу виявлено сліди оксиду самарію та >12% кобальту (табл. 1).

**Взаємодія з воднем стопу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{16,9}\text{Ti}_{0,1}$ .** За даними РФА, литий стоп  $\text{Sm}_2\text{Co}_{16,9}\text{Ti}_{0,1}$  є однофазним (табл. 1).



**Рис. 3.** Дифрактограми стопу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{16.8}\text{Ti}_{0.2}$ : в литому стані (а); після диспропорціонування у водні під тиском 3,0 МПа за температури 700°C, витримка 3 год. (б); після рекомбінування за температури 850°C (в).

**Fig. 3.** XRD patterns of the  $\text{Sm}_2\text{Co}_{16.8}\text{Ti}_{0.2}$  alloy: as-cast (a); after disproportionation under hydrogen pressure of 3.0 MPa at 700°C during 3 h (b); after recombination in a vacuum at 850°C (c).

Після взаємодії з воднем під тиском 3,0 МПа за температури 700°C (солід ГД) та тривалості реакції у 3 год. вихідна феромагнетна фаза зі структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  повністю розпадається на гідрид самарію та кобальт (табл. 1), а за температури 850°C у вакуумі рекомбінує (табл. 1). Крім кобальту, є сліди оксиду самарію.

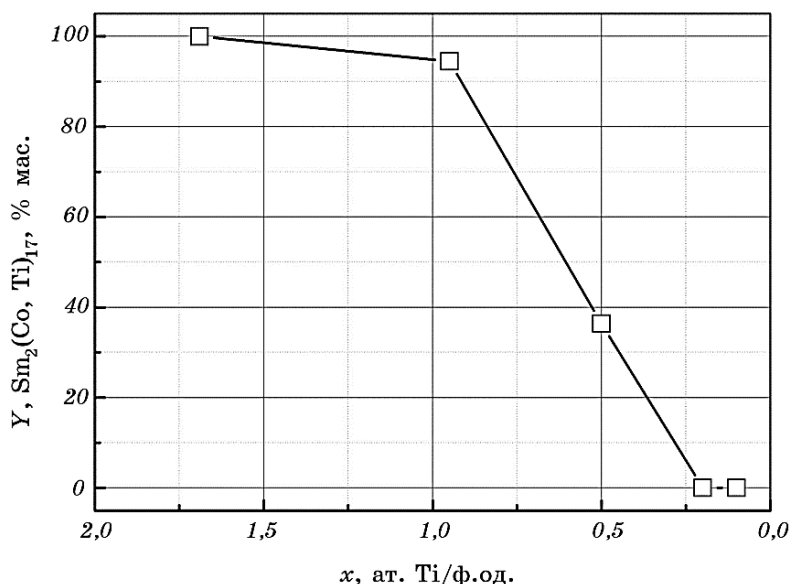
#### 4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Заміна частини кобальту титаном у  $\text{Sm}_2(\text{Co},\text{Ti})_{17}$  суттєво впливає на умови диспропорціонування литого стопу у водні. Так, залежність кількості фази зі структурою типу  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  у стопі після взаємодії з воднем за тиску 3,0 МПа тривалістю 3 год., від вмісту в ньому тита-



ну вказує на наступне (рис. 4). Коли вміст титану  $\cong 1$  ат./ф.од. (5 ат.%) і більше феромагнетна фаза або лише починає розпадатися, або взагалі не розпадається. Тобто для застосування ГДДР для здрібнення мікроструктури таких матеріалів необхідно підвищити тиск водню або збільшити тривалість оброблення, що призводить до технологічних ускладнень. У стопі з 0,5 ат. Ti/ф.од. (2,6 ат.%) більше половини феромагнетної фази розпадається, а у стопах з нижчим вмістом титану — вона розпадається повністю. Якщо прийняти до уваги, що, з одного боку, найперспективнішим способом здрібнення мікроструктури даного типу матеріалів є поєднання їх помелу та термічного оброблення у водні [1], а з іншого, факт, що у розмелених стопах параметри термічного водневого оброблення «м'якші» (нижчий тиск водню чи то коротша тривалість процесу) [10], то для подальших досліджень можна працювати зі стопами з вмістом титану  $\leq 0,5$  ат./ф.од. ( $\leq 2,6$  ат.%). Така концентрація титану в  $\text{Sm}_2(\text{Co}, \text{Ti})_{17}$  є оптимальною і з точки зору його впливу на магнетні властивості цих матеріалів [11].

Поява кобальту в стопах після ГДДР (табл. 1) може бути спричинена двома чинниками. Наявність певної його кількості в литому



**Рис. 4.** Залежність кількості феромагнетної фази в стопі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  від вмісту титану після нагрівання стопу до  $700^\circ\text{C}$  у водні під тиском 3,0 МПа з витриманням 3 год.

**Fig. 4.** Amount of the ferromagnetic phase in the alloy  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ti}_x$  vs. titanium content after heating the alloy to  $700^\circ\text{C}$  in hydrogen under pressure of 3.0 MPa during 3 h.

матеріалі, і не виявленого РФА [8], внаслідок недостатнього, для компенсації випаровування під час топлення, надлишку самарію у шихті. Крім того, частину самарію вилучено зі взаємодії з кобальтом внаслідок окиснення, яке відбулося під час ДР у форвакуумі.

## 5. ВИСНОВКИ

Встановлено вплив концентрації титану в стопах  $\text{Sm}_2(\text{Co}, \text{Ti})_{17}$  на параметри їх диспропорціонування у водні. Показано, що вміст титану в  $\text{Sm}_2(\text{Co}, \text{Ti})_{17}$  не повинен перевищувати 0,5 ат./ф.од. Такі матеріали диспропорціонують частково або повністю після взаємодії впродовж 3 год. з воднем під тиском 3,0 МПа, а у форвакуумі рекомбінують за температури 850°C.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. І. І. Булик, В. В. Панасюк, *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, № 1: 9 (2012).
2. И. И. Булык, В. Н. Варюхин, В. Ю. Таренков, В. В. Бурховецкий, С. Л. Сидоров, *Физика и техника высоких давлений*, 23, № 4: 67 (2013).
3. І. І. Булик, Ю. Б. Басараба, А. М. Тростянчин, *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, № 6: 67 (2004).
4. І. І. Булик, Р. В. Денис, В. В. Панасюк, Ю. Г. Путілов, А. М. Тростянчин, *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, 37, № 4: 15 (2001).
5. І. І. Булик, Ю. Б. Басараба, А. М. Тростянчин, В. М. Давидов, *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, № 3: 101 (2005).
6. <http://www.ccp14.ac.uk/>
7. <http://www.ill.eu/sites/fullprof>
8. І. І. Булик, П. Я. Лютий, *Металлофиз. новейшие технол.*, 35, № 9: 1283 (2013).
9. І. І. Булик, П. Я. Лютий, А. М. Тростянчин, *Металлофиз. новейшие технол.*, 33, № 6: 807 (2011).
10. І. І. Булик, А. М. Тростянчин, П. Я. Лютий, В. В. Бурховецький, *Порошковая металлургия*, № 9/10: 56 (2013).
11. W. Wang, Y. Yan, and H. Jin, *Physica B*, 328: 372 (2003).

## REFERENCES

1. I. I. Bulyk and V. V. Panasyuk, *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, No. 1: 9 (2012) (in Ukrainian).
2. I. I. Bulyk, V. N. Varyukhin, V. Yu. Tarenkov, V. V. Burkhovetskyi, and S. L. Sidorov, *Fizika i Tekhnika Vysokikh Davleniy*, 23, No. 4: 67 (2013) (in Russian).
3. I. I. Bulyk, Yu. B. Basaraba, and A. M. Trostianchyn, *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, No. 6: 67 (2004) (in Ukrainian).
4. I. I. Bulyk, P. V. Denys, V. V. Panasyuk, Yu. G. Putilov, and A. M. Trostianchyn, *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, 37, No. 4: 15 (2001) (in

- Ukrainian).
5. I. I. Bulyk, Yu. B. Basaraba, A. M. Trostianchyn, and V. M. Davydov, *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, No. 3: 101 (2005) (in Ukrainian).
  6. <http://www.ccp14.ac.uk/>
  7. <http://www.ill.eu/sites/fullprof>
  8. I. I. Bulyk and P. Ya. Lyutyy, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **35**, No. 9: 1283 (2013) (in Ukrainian).
  9. I. I. Bulyk, P. Ya. Lyutyy, and A. M. Trostianchyn, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **33**, No. 6: 807 (2011) (in Ukrainian).
  10. I. I. Bulyk, A. M. Trostianchyn, P. Ya. Lyutyy, and V. V. Burkhovetskyi, *Poroshkovaya Metallurgiya*, Nos. 9/10: 56 (2013) (in Ukrainian).
  11. W. Wang, Y. Yan, and H. Jin, *Physica B*, **328**: 372 (2003).