

PACSnumbers: 61.05.cp, 61.66.Dk, 64.70.kd, 64.70.Nd, 75.50.Cc, 75.50.Ww, 81.07.Bc

## Вплив тиску водню на особливості диспропорціонування $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

І. І. Булик, П. Я. Лютий

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

Методами Рентгенівського фазового, диференціального термічного, електронного мікроскопічного та елементного аналізів досліджено фазові перетворення в системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}\text{-H}_2$  під тиском водню у 0,5–3,0 МПа за температури до 950°C та тривалості взаємодії у 2,5 і 5 год. При температурі 750°C фаза  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  диспропорціонує (розкладається) у водні на гідрид самарію  $\text{SmH}_{2\pm x}$  та дві поліморфні модифікації кобальту  $\alpha\text{-Co}$  і  $\beta\text{-Co}$ . Ступінь диспропорціонування фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  збільшується з підвищенням тиску водню. Повністю реакція завершується за температури у 750°C і тиску у 3,0 МПа або після взаємодії 2,5 год. при температурі у 770°C під тиском водню у 1,5 МПа. При температурі у 950°C в системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}\text{-H}_2$  перебігає реакція рекомбінування  $\text{SmH}_{2\pm x}$ ,  $\alpha\text{-Co}$  і  $\beta\text{-Co}$  у фазу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ . Під тиском водню у 1,0–1,5 МПа рекомбінація повна, а при вищому — часткова.

Методами рентгеновского фазового, дифференциального термического, электронного микроскопического и элементного анализов исследованы фазовые превращения в системе  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}\text{-H}_2$  под давлением водорода 0,5–3,0 МПа при температуре до 950°C и выдержке 2,5 и 5 ч. При температуре 750°C фаза  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  диспропорционирует в водороде на гидрид самария  $\text{SmH}_{2\pm x}$  и две полиморфные модификации кобальта  $\alpha\text{-Co}$  и  $\beta\text{-Co}$ . С повышением давления водорода степень диспропорционирования фазы  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  увеличивается. Полностью реакция завершается при температуре 750°C и давлении 3,0 МПа либо после взаимодействия 2,5 ч при температуре 770°C под давлением водорода 1,5 МПа. При температуре 950°C в системе  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}\text{-H}_2$  фазы  $\text{SmH}_{2\pm x}$ ,  $\alpha\text{-Co}$  и  $\beta\text{-Co}$  рекомбинируют в  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ . Под давлением водорода 1,0–1,5 МПа рекомбинация полная, а с повышением давления — частичная.

Phase transformations in the  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}\text{-H}_2$  system are investigated by X-ray powder diffraction, differential thermal, electron microscopy, and elemental analyses under hydrogen pressure of 0.5–3.0 МПа at the temperature up to 950°C during 2.5 and 5 h of interaction. The  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  phase disproportionates

at the temperature of 750°C in hydrogen into the samarium hydride  $\text{SmH}_{2\pm x}$  and two cobalt polymorphic forms— $\alpha$ -Co and  $\beta$ -Co. The disproportionation degree of  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  increases with increasing of the hydrogen pressure. The phase transformation is completed at 750°C under hydrogen pressure of 3.0 MPa or after interaction during 2.5 hours at temperature of 770°C under hydrogen pressure of 1.5 MPa. The  $\text{SmH}_{2\pm x}$ ,  $\alpha$ -Co and  $\beta$ -Co phases recombine into the  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  phase in the  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}\text{-H}_2$  system at the temperature of 950°C. Recombination is complete under the pressure of 1.0–1.5 MPa, and it is partial under higher pressure.

**Ключові слова:** фазові перетворення, гідрування, водень, диспропорціонування, десорбування, рекомбінування, сталі магніти.

*(Отримано 29 листопада 2011 р.; остаточн. варіант — 13 травня 2013 р.)*

## 1. ВСТУП

Нанокристалічні матеріали, включаючи феромагнітні, перебувають у центрі уваги численних дослідників в останні кілька десятиліть, завдяки своїм унікальним властивостям. Тому науково-дослідні роботи в галузі сталих магнітів сконцентровано на оптимізації властивостей наноструктур стопів на основі систем Nd–Fe–B та Sm–Co, які в мікроструктурі мають найвищі магнітні властивості. Згідно з теоретичною моделлю, магнітні наноконізити з обмінною взаємодією, які складаються з магнітом'якої  $\alpha$ -Fe (Co або FeCo) та магнітотвердої  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  ( $\text{SmCo}_5$  або  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ) фаз, можуть мати в два рази вищу, ніж існуючі магніти, питому магнітну енергію [1]. Нанокристалічну мікроструктуру у феромагнітних матеріалах формують швидкісним охолодженням (спінінгуванням) [2], механічним топленням [3], високоенергетичним помелом [4] тощо. Відомо [5, 6], що під час виготовлення сталих магнітів на основі  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  застосовують воднево-вакуумне термічне оброблення, так званий процес гідрування, диспропорціонування/розкладання, десорбування, рекомбінування (ГДДР). Таке оброблення призводить до здрібнення мікроструктури стопів Nd–Fe–B з формуванням зерен з розмірами  $\cong 0,3$  мкм [7]. Досліджено [8–10] особливості процесу ГДДР у стопах на основі сполук  $\text{SmCo}_5$  і  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , високостійких у водні, з використанням водню під високим тиском та помелу у водні. Зокрема, встановлено формування наноструктури з розміром зерен  $\cong 25$  нм та підвищення магнітних властивостей. З іншого боку [11] показано, що намагніченість та питома магнітна енергія  $(BH)_{\text{max}}$  композиційних магнітів з розміром зерен  $>100$  нм також підвищуються внаслідок обмінної взаємодії. Тому, дослідження закономірностей, ініційованих воднем фазових перетворень (ГДДР) у сполуках та стопах системи самарій–кобальт, є перспективним з точки зору створення наукової основи для розвитку тех-

нологій формування наноструктури у феромагнітних матеріалах цього класу.

У даній роботі наведено результати дослідження особливостей гідрування, диспропорціонування (ГД) сполуки  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ . Встановлено залежність фазового складу продуктів ініційованих воднем перетворень від тиску водню, температури та тривалості.

## 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Стопи  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  одержали із шихти вихідних компонентів з чистотою не нижче 99,5% мас. в електродуговій печі в атмосфері аргону. ГД виконували за методикою, описаною в [12], з використанням диференціального термічного аналізу (ДТА). Швидкість нагрівання дорівнювала  $5^\circ\text{C}/\text{хв.}$ , швидкість охолодження — неконтрольована (піч знімали з камери, камеру охолоджували на повітрі). Взаємодію в системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}-\text{H}_2$  досліджували за умов звичайного ГД [13]. Початковий надлишковий тиск водню дорівнював 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 і 3,0 МПа. Раніше [14] показано, що під початковим тиском водню 4,0 МПа в системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}-\text{H}_2$  при температурі рівній  $\cong 670^\circ\text{C}$  феромагнітна фаза  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  диспропорціонує на гідрид самарію та кобальт, а з підвищенням температури до  $950^\circ\text{C}$  гідрид самарію та кобальт рекомбінують у вихідну фазу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ . Під час нагрівання системи  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}-\text{H}_2$  під початковим тиском водню  $\leq 3,0$  МПа до найвищої температури  $950^\circ\text{C}$  на кривій ДТА не зареєстровано теплових ефектів. Тому склад продуктів фазових перетворень у системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}-\text{H}_2$  аналізували при температурах нагрівання  $750-770^\circ\text{C}$ , вище температури диспропорціонування фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , та при температурі  $950^\circ\text{C}$  — найвищій температурі нагрівання. Рентгенівський фазовий аналіз (РФА) виконували за дифрактограмами, знятими на дифрактометрі ДРОН-2.0 М ( $\text{FeK}_\alpha$ -випромінення). Фази ідентифікували за допомогою програми PowderCell [15], порівнюючи експериментальні дифрактограми з теоретичними чистих металів, бінарних сполук та їх гідридів. Періоди кристалічних ґратниць фаз та їх вміст визначали за допомогою програми FullProf [16]. Мікроструктуру досліджували методом електронної металографії на мікроскопі EVO-40XVP, елементний склад аналізували за допомогою системи мікроаналізу INCA Energy 350.

## 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

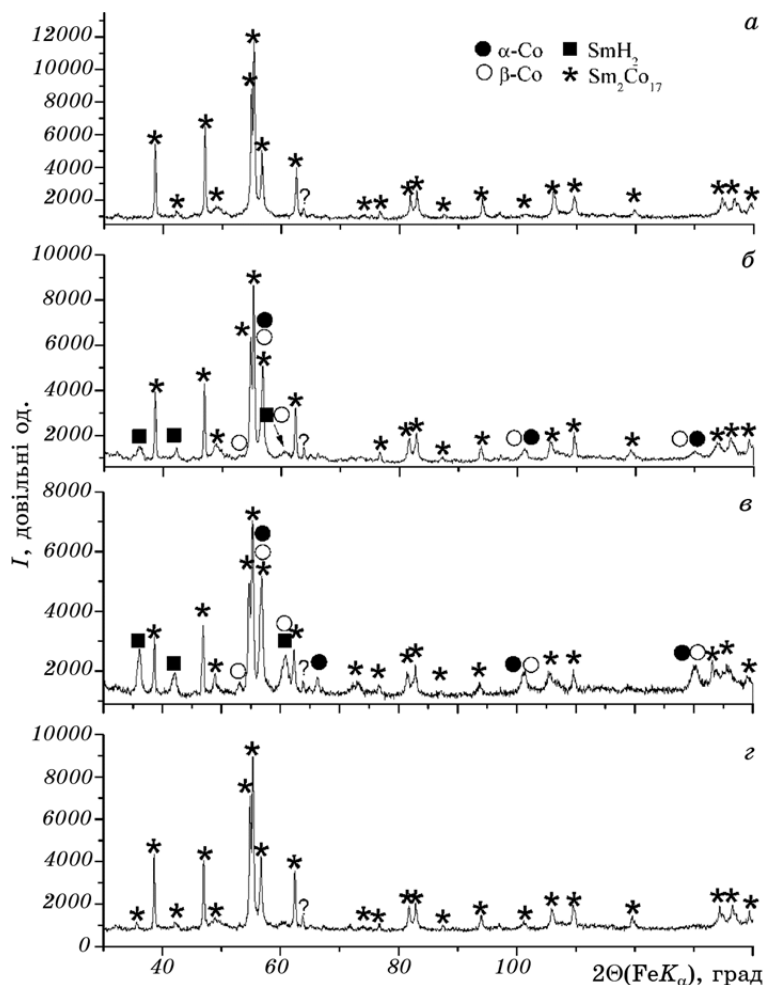
### 3.1. Фазові перетворення в системі $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}-\text{H}_2$ під тиском водню, що дорівнює 0,5 і 1,0 МПа

Литий стоп містить сполуку  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  та сліди неідентифікованої до-

мішки (рис. 1, а).

Нагрівання литого стопу до температури 750°C у водні під початковим тиском 0,5 МПа, витримування при цій температурі тривалістю 2,5 і 5 год. призводить до гомогенізації фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  (табл. 1).

За даними РФА, з підвищенням температури до 950°C, крім фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , виявлено гідрид самарію та дві поліморфні модифікації кобальту (високотемпературну  $\alpha\text{-Co}$  і низькотемпературну  $\beta\text{-Co}$ ) (табл. 1). Тобто, внаслідок взаємодії з воднем, фаза  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  починає розпадатися (диспропорціонувати).



**Рис. 1.** Дифрактограми литого стопу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  (а) та продуктів його взаємодії з воднем під початковим тиском 1,0 МПа за температури 750°C (б), а також після витримування тривалістю 2,5 год. за температур 770°C (в) та 950°C (г).

При початковому тиску водню рівному 1,0 МПа і температурі 750°C фаза  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  частково розпадається на гідрид самарію та дві поліморфні модифікації кобальту (табл. 1, рис. 1, б). Зі збільшенням тривалості фазового перетворення до 2,5 год. ступінь диспропорціонування фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  збільшується (табл. 1, рис. 1, в).

Серед продуктів реакції виявлено  $\text{SmH}_{2\pm x}$  і дві поліморфні модифікації кобальту.

Підвищення температури взаємодії в системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}-\text{H}_2$  до 950°C призводить до рекомбінування продуктів диспропорціонування у фазу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  (табл. 1, рис. 1, з).

**ТАБЛИЦЯ 1.** Умови, фазовий склад та періоди ґратниць продуктів взаємодії в системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}-\text{H}_2$ .

Умови взаємодії			Фаза	Вміст фази, % мас.	Періоди ґратниць, Å	
$P_{\text{H}_2}$ , МПа	$T$ , °C	$\tau$ , год			$a$	$c$
1	2	3	4	5	6	7
	Литий		$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	100	8,394(5)	12,226(4)
0,5	750	–	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	$\cong 100$	8,416(5)	12,216(4)
0,5	750	2,5	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	$\cong 100$	8,399(1)	12,226(2)
0,5	750	5	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	100	8,398(7)	12,222(3)
0,5	950	–	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	81	8,401(7)	12,219(5)
			$\text{SmH}_{2\pm x}$	2	5,483(6)	–
			$\alpha\text{-Co}$	7	3,554(2)	–
			$\beta\text{-Co}$	10	2,509(1)	4,069(5)
1,0	750	–	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	83	8,421(2)	12,213(4)
			$\text{SmH}_{2\pm x}$	3	5,422(9)	–
			$\alpha\text{-Co}$	10	3,544(8)	–
			$\beta\text{-Co}$	5	2,508(5)	4,069(5)
1,0	770	2,5	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	61	8,436(1)	12,210(9)
			$\text{SmH}_{2\pm x}$	7	5,416(7)	–
			$\alpha\text{-Co}$	14	3,541(9)	–
			$\beta\text{-Co}$	18	2,510(9)	4,069(5)
1,0	770	5	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	76	8,411(2)	12,224(2)
			$\beta\text{-Co}$	19	2,510(9)	4,069(7)
			$\text{SmH}_{2\pm x}$	5	5,408(3)	–
1,0	950	–	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	100	8,400(7)	12,2242
1,5	750	–	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	62	8,422(7)	12,223(8)
			$\text{SmH}_{2\pm x}$	6	5,383(9)	–
			$\alpha\text{-Co}$	19	3,544(1)	–
			$\beta\text{-Co}$	13	2,511(8)	4,069(5)

Продовження таблиці 1.

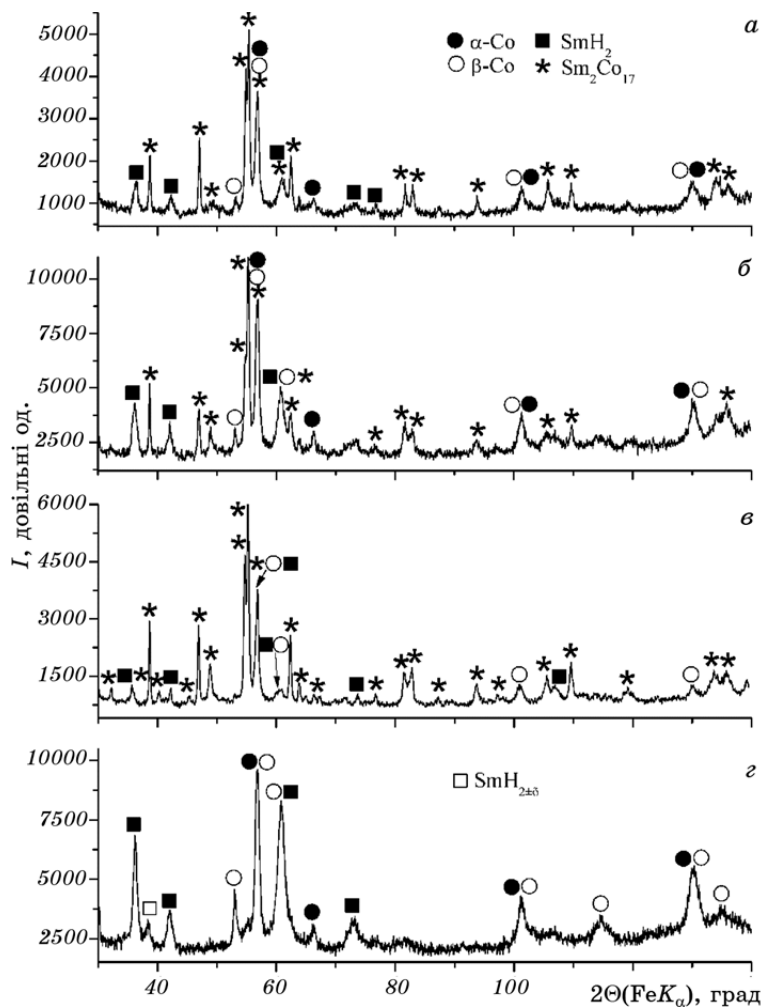
1	2	3	4	5	6	7
1,5	770	2,5	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	5	8,447(8)	12,248(2)
			SmH <sub>2±x</sub>	11	5,418(8)	–
			α-Co	25	3,542(5)	–
			β-Co	59	2,509(9)	4,069(5)
1,5	860	–	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	49	8,433(2)	12,215(2)
			SmH <sub>2±x</sub>	2	5,412(2)	–
			α-Co	19	3,542(3)	–
			β-Co	30	2,507(5)	4,069(5)
1,5	950	–	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	100	8,434(4)	12,221(1)
			SmH <sub>2±x</sub>	сліди	–	–
			β-Co	сліди	–	–
2,0	750	–	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	22	8,459(4)	12,203(7)
			SmH <sub>2±x</sub>	15	5,406(5)	–
			α-Co	21	3,540(6)	–
			β-Co	42	2,503(7)	4,069(5)
2,0	750	2,5	SmH <sub>2±x</sub>	8	5,416(9)	–
			α-Co	27	3,542(3)	–
			β-Co	65	2,509(2)	4,074(8)
2,0	950	–	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	76	8,428(9)	12,220(6)
			SmH <sub>2±x</sub>	4	5,427(1)	–
			α-Co	10	3,542(8)	–
			β-Co	10	2,505(9)	4,069(5)
3,0	750	–	SmH <sub>2±x</sub>	13	5,410(1)	–
			α-Co	40	3,545(2)	–
			β-Co	47	2,509(5)	4,078(1)
3,0	950	–	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	21	8,416(7)	12,222(7)
			SmH <sub>2±x</sub>	13	5,362(6)	–
			α-Co	10	3,542(6)	–
			β-Co	56	2,509(3)	4,069(5)

### 3.2. Фазові перетворення в системі Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>–H<sub>2</sub> під тиском водню, що дорівнює 1,5, 2,0 і 3,0 МПа

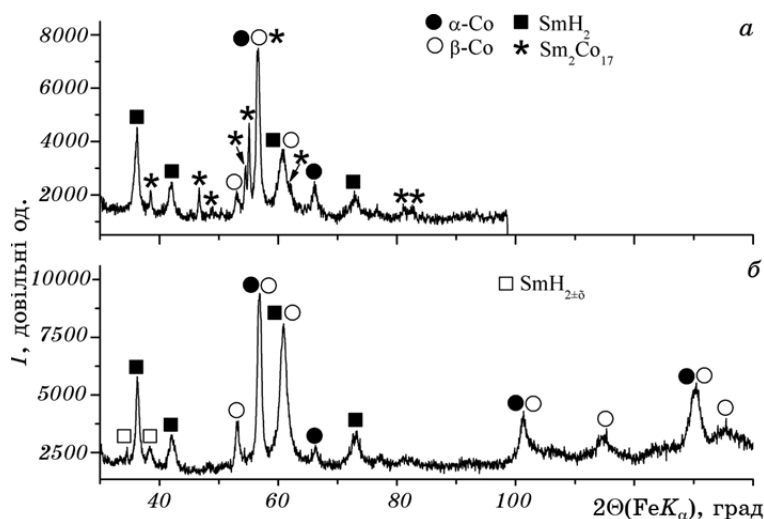
Під початковим тиском водню 1,5 МПа та температурі 750°C фазові перетворювання в системі Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>–H<sub>2</sub> завершуються розпадом ≅ 38% мас. фази Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> на гідрид самарію SmH<sub>2±x</sub> та дві поліморфні модифікації кобальту (табл. 1, рис. 2, а). Після підвищення температури взаємодії до 860°C диспропорціонує більше половини фази Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> (табл. 1, рис. 2, б). При температурі 950°C рівновага реакції зміщується в бік рекомбінування продуктів диспропорціонування у

вихідну фазу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , що виявлено за допомогою РФА (табл. 1, рис. 2, *в*). Якщо систему  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}-\text{H}_2$  витримати 2,5 год. при температурі  $770^\circ\text{C}$ , то фаза  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  майже повністю розпадається (диспропорціонує) (табл. 1, рис. 2, *г*).

З підвищенням початкового тиску водню до 2,0 МПа при температурі  $750^\circ\text{C}$  трохи менше 80% мас. вихідної фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  перетворюється на  $\text{SmH}_{2\pm x}$  та  $\alpha$ - і  $\beta$ -Co (табл. 1, рис. 3, *а*). При температурі  $950^\circ\text{C}$  відбувається зворотне фазове перетворення — часткове рекомбінування  $\text{SmH}_{2\pm x}$  та  $\alpha$ - і  $\beta$ -Co у фазу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  (табл. 1). Продовжен-



**Рис. 2.** Дифрактограми продуктів взаємодії ступу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  з воднем під початковим тиском 1,5 МПа за температур  $750^\circ\text{C}$  (*а*),  $860^\circ\text{C}$  (*б*),  $950^\circ\text{C}$  (*в*) та після витримування тривалістю 2,5 год. при температурі  $770^\circ\text{C}$  (*г*).



**Рис. 3.** Дифрактограми продуктів взаємодії ступу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  з воднем під початковим тиском 2,0 МПа за температури 750°C без витримування (а) і після витримування тривалістю 2,5 год. (б).

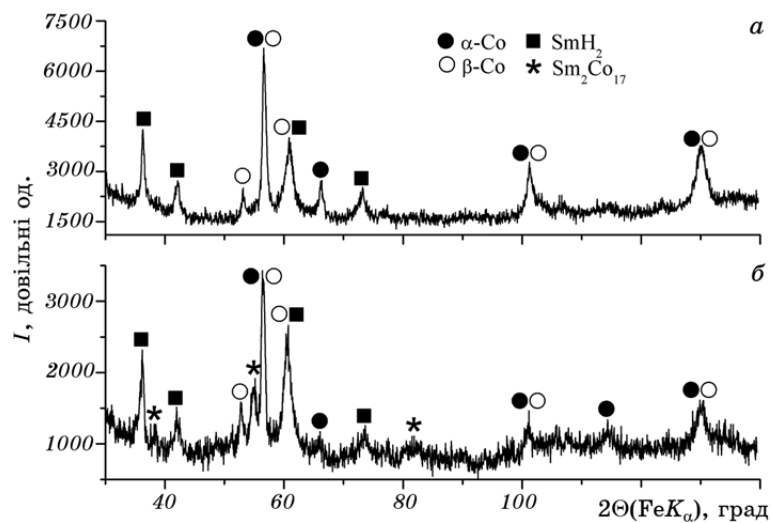
ня тривалості взаємодії до 2,5 год. при температурі 750°C завершується повним диспропорціонуванням фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  (табл. 1, рис. 3, б).

З підвищенням початкового тиску водню до 3,0 МПа фазові перетворювання в системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}-\text{H}_2$  прискорюються. Згідно з даними РФА, після взаємодії ступу з воднем при температурі 750°C фаза  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  повністю диспропорціонує (табл. 1, рис. 4, а). При температурі 950°C розпочинається зворотна реакція рекомбінування. Крім продуктів диспропорціонування виявлено  $\approx 20\%$  мас. рекомбінованої фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  (табл. 1, рис. 4, б).

#### 4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Температура диспропорціонування інтерметалідів у водні з підвищенням тиску знижується [10, 17]. Пояснюють це залежністю термодинамічних параметрів фаз-компонентів системи «стоп-водень» від температури та тиску водню. Під час диспропорціонування у водні високостабільних сполук величина тиску водню суттєво впливає, в першу чергу, на швидкість протікання перетворювання [18, 19]. Аналогічну закономірність спостерігаємо в системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}-\text{H}_2$  в діапазоні тисків 0,5–3 МПа (рис. 5). За умов нагрівання і охолодження у водні під початковим тиском 1,0 МПа реакція диспропорціонування лише розпочинається, а повністю завершується якщо тиск рівний 3,0 МПа. Збільшити ступінь диспропорціонування  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  (частку фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , яка зазнала фазового перетворення



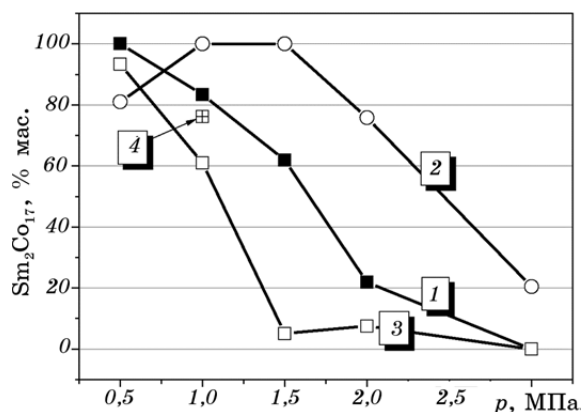


**Рис. 4.** Дифрактограми продуктів взаємодії стопу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  з воднем під початковим тиском 3,0 МПа за температури 750°C (а) і 950°C (б).

ня) можна шляхом витримування, наприклад 2,5 год., системи  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}\text{-H}_2$  при температурі 750–770°C. За таких умов взаємодії, після досягнення тиску водню 1,5 МПа, серед продуктів диспропорціонування залишається лише кілька відсотків вихідної фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ .

Склад продуктів фазових перетворень при температурі 950°C зумовлений, на нашу думку, залежністю термодинамічної стабільності гідриду самарію від параметрів взаємодії — тиску водню і температури. При низьких тисках (0,5–1,0 МПа) водень виділяється з гідриду самарію, який утворився під час диспропорціонування при нижчій температурі, самарій взаємодіє з кобальтом, і утворюється фаза  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ . З підвищенням тиску водню підвищується стабільність гідриду, і частка рекомбінованої фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  зменшується.

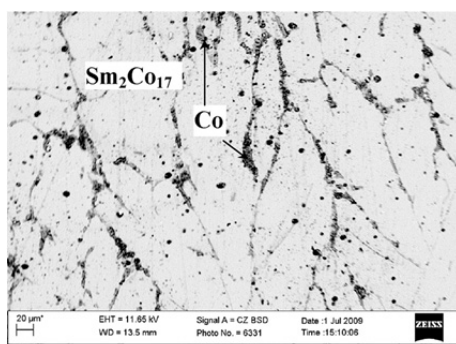
Поява кобальту серед продуктів фазових перетворень при тиску 0,5 МПа та температурі 950°C зумовлена складом досліджуваного стопу. Хоча, за даними РФА, кобальт у вихідному стопі не виявлено (рис. 1, а, табл. 1), за даними електронної мікроскопії та елементного аналізу вихідний стоп складається з фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  та міжфазних виділень кобальту (рис. 6). Виділення Co ідентифіковано після термооброблення стопу у водні при температурах 750°C з витримуванням 2,5 год. та 950°C (табл. 1). Імовірною причиною одержання таких результатів може бути різний структурний стан кобальту у вихідному і термообробленому стопі. Наприклад, у литому стопі кобальт рентгеноаморфний. Тоді його відбиття на дифрактограмі малоінтенсивні або відсутні. Після термооброблення кобальт рек-



**Рис. 5.** Залежність вмісту фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  в системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}\text{-H}_2$  від параметрів взаємодії: тиску водню, температури (1 —  $750^\circ\text{C}$ , 2 —  $950^\circ\text{C}$ ) та тривалості (3 —  $750^\circ\text{C}$ , 2,5 год., 4 —  $750^\circ\text{C}$ , 5 год.).

ристалізується і стає «видимим» на Рентгенівській дифрактограмі. Поява кобальту на дифрактограмах, після фазових перетворень у стопі при підвищених температурах, також дозволяє пояснити відносно низький вміст гідриду самарію в продуктах диспропорціонування. Оскільки у фазі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  міститься  $\cong 23,1\%$  мас. самарію, то вміст гідриду самарію в продуктах диспропорціонування повинен бути близьким до цієї величини, однак рекристалізований кобальт зменшує це співвідношення (табл. 1).

Із залежності вмісту фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  в продуктах диспропорціонування стопу від тиску водню і тривалості фазового перетворення впливає наступне. Ініційовані воднем фазові перетворення можна використовувати в прикладних цілях, зокрема, розробляти технологічні процеси керування мікроструктурою феромагнітних стопів. Можна керувати ступенем диспропорціонування або підвищуючи



**Рис. 6.** Мікроструктура литого стопу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ .

тиск водню, або, за сталого тиску, змінюючи тривалість взаємодії. Оптимальними параметрами диспропорціонування фази  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , згідно з даними, поданими на рис. 5, є взаємодія стопу з воднем 2,5 год. під тиском  $\cong 1,5$  МПа. При нижчих тисках (1,0 МПа) навіть тривале (впродовж 5 год.) витримування стопу у водні не завершується повним диспропорціонуванням.

## 5. ВИСНОВКИ

Встановлено вплив тиску водню та тривалості взаємодії на продукти фазових перетворень у системі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}-\text{H}_2$  за умов гідрування, диспропорціонування. Стоп повністю диспропорціонує на гідрид самарію і  $\alpha$ - та  $\beta$ -поліморфні модифікації кобальту при температурі  $750^\circ\text{C}$  під тиском водню 3,0 МПа. При температурі  $770^\circ\text{C}$  і тиску водню 1,5 МПа стоп диспропорціонує після витримування у водні впродовж 2,5 годин. При температурі  $950^\circ\text{C}$  гідрид самарію та кобальт частково рекомбінують у фазу  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ .

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. E. F. Kneller and R. Hawing, *IEEE Transactions Magnetism*, **27**: 3588 (1991).
2. J. J. Croat, J. F. Herbst, R. W. Lee, and F. E. Pinkerton, *J. Appl. Phys.*, **55**: 2078 (1984).
3. L. Schultz, J. Wecker, and E. Hellstern, *J. Appl. Phys.*, **61**: 3583 (1987).
4. B. Z. Cui, W. F. Li, and G. C. Hadjipanayis, *Acta Mater.*, **59**: 563 (2011).
5. N. Cannesan and I. R. Harris, *Bonded Magnets. NATO Science Series: II. Mathematics, Physics and Chemistry* (Ed. G. C. Hadjipanayis) (Dordrecht-Boston: Springer-Science+Business Media, B.V.: 2002), vol. **118**, p. 13.
6. O. Gutfleisch, G. Drazic, C. Mishima, and Y. Honkura, *IEEE Transactions Magnetism*, **38**, No. 5-1: 2958 (2002).
7. O. Gutfleisch, M. Matzinger, J. Fidler, and I. R. Harris, *J. Magn. Magn. Mater.*, **147**: 320 (1995).
8. M. Kubis, A. Handstein, B. Gebel, O. Gutfleisch, K.-H. Muller, and L. Schultz, *J. Appl. Phys.*, **85**, No. 8: 5666 (1999).
9. O. Gutfleisch, M. Kubis, A. Handstein, K.-H. Muller, and L. Schultz, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, No. 20: 3001 (1998).
10. A. Handstein, M. Kubis, O. Gutfleisch, B. Gebel, and K.-H. Muller, *J. Magn. Magn. Mater.*, **192**: 73 (1999).
11. G. Hadjipanayis, J. Liu, A. Gabay, and M. Marinescu, *J. Iron Steel Res. Int.*, **13**, Suppl. 1: 12 (2006).
12. І. І. Булик, Р. В. Денис, В. В. Панасюк, Ю. Г. Путілов, А. М. Тростянчин, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **37**, №4: 15 (2001).
13. І. І. Булик, Ю. Б. Басараба, А. М. Тростянчин, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **41**, № 3: 101 (2005).
14. І. І. Булик, П. Я. Лютий, А. М. Тростянчин, *Металлофиз. новейшие техн.*, **33**: 807 (2011).

15. <http://www.ccp14.ac.uk>
16. [www.ill.eu/sites/fullprof](http://www.ill.eu/sites/fullprof)
17. D. Book and I. R. Harris, *J. Alloys Compd.*, **221**: 187 (1995).
18. I. I. Bulyk, Y. B. Basaraba, and A. M. Trostianchyn, *J. Alloys Compd.*, **367**: 283 (2004).
19. I. I. Bulyk, Y. B. Basaraba, and Ya. O. Dovhyj, *Intermetallics*, **14**: 735 (2006).