

УДК 546.3–19'11

ФАЗОВІ РІВНОВАГИ В СИСТЕМІ Y–Hf–Fe ТА ВОДЕНЬСОРБЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ

В. О. ЛЕВИЦЬКИЙ¹, В. С. БАБІЖЕЦЬКИЙ¹, О. Р. М'ЯКУШ¹,
І. В. КОВАЛЬЧУК², О. Б. РЯБОВ², Б. Я. КОТУР¹

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Методами рентгенофазового, рентгеноструктурного та локального рентгеноспектального аналізу досліджено взаємодію компонентів у потрійній системі Y–Hf–Fe та побудовано ізотермічний переріз діаграми стану при 800°C. Встановлено протяжність твердих розчинів заміщення на основі бінарних сполук YFe₃ (Y_{1-x}Hf_xFe₃, 0 ≤ x ≤ 0,2) та Y₂Fe₁₇ (Y_{2-x}Hf_xFe₁₇, 0 ≤ x ≤ 1,3). Методом монокристала вперше уточнено кристалічну структуру сполуки Hf_{0,93}Fe₂ (СТ MgZn₂, ПГ P6₃/mmc, СП hP12, a = 0,49440(7) nm, c = 0,8066(2) nm). Досліджено воденьсорбційні властивості сплавів складу Y_{1-x}Hf_xFe₂ зі структурою фази Лавеса C15, Y_{1-x}Hf_xFe₃ зі структурою типу PuNi₃ та (Hf_{1-x}Y_x)₂Fe зі структурою типу Ti₂Ni.

Ключові слова: фазові рівноваги, кристалічна структура, металогідриди.

Вивчення фазових рівноваг в системі Y–Hf–Fe є частиною систематичного дослідження систем R–{Ti, Zr, Hf}–M (R – рідкісноземельний метал, M – 3d-метал) для пошуку нових інтерметалічних сполук, які можуть використовуватись як ефективні акумулятори водню.

Серед потрійних систем R–{Ti, Zr, Hf}–M діаграми фазових рівноваг у повному концентраційному інтервалі побудовані лише для систем Y–Ti–Fe при 600°C, Y–Ti–Ni при 500°C, Gd–Zr–Fe при 800°C та для Gd–Ti–Fe при 1100°C в області 0,7...1,0 at.% Fe [1–4]. Досліджено характер взаємодії компонентів та воденьсорбційні властивості сплавів систем Er–Ti–Fe та Y–Zr–{Ni, Cu} при 600°C [6, 7]. В інших системах вивчались лише структура та фізичні властивості сплавів R_{2-x}R'_xM₁₇; R_{1-x}R'_xM₃; R_{1-x}R'_xM₂ (R – рідкісноземельний метал; R' – гідридотвірний метал (Ti, Zr, Hf), M – 3d-метал) та їх гідридів [8–11]. Зокрема, воденьсорбційні властивості та структурні характеристики отримали для елементарних дигідридів HfH₂ та YH₂ (тип CaF₂), тригідриду YH₃ (тип HoH₃) [12], а також для гідридів ряду бінарних сполук, існуючих в системі Y–Hf–Fe: YFe₂, YFe₃, Y₆Fe₂₃, Y₂Fe₁₇, Hf₂Fe. Водночас виявлено, що HfFe₂ не поглинає водень [13]. Проте можна припустити, що, з огляду на хімічну спорідненість та параметри комірки кубічних фаз Лавеса HfFe₂ та ZrFe₂, гідрид фази HfFe₂ можна синтезувати за надвисоких тисків. Наприклад, гідрид ZrFe₂H_{3,5} синтезували при 80°C за тиску вище 1,1 GPa, а розклад гідриду спостерігали за тиску 35 MPa [15].

Для уточнення та перевірки літературних даних, а також для фазового аналізу синтезували 60 сплавів. Зразки готували сплавленням шихти з вихідних компонентів високої чистоти (≥99,9 mass.%) методом електродугової плавки в атмосфері очищеного аргону. Для гомогенізації сплавів їх відпалювали у вакуумованих кварцових ампулах за температури 800°C впродовж 720 h.

Контактна особа: І. В. КОВАЛЬЧУК, e-mail: kovalchuk@ipm.lviv.ua

Гідриди синтезували за кімнатної температури під тиском водню 120 kPa в автоклаві після попередньої активації зразків у вакуумі при 350...400°C. Характеристики абсорбції водню синтезованих сплавів визначали стандартним манометричним методом у постійному об'ємі.

Фазовий аналіз сплавів проводили за масивом результатів дифракції рентгєнівського випромінювання, одержаних з дифрактометра ДРОН-2,0 (FeK $_{\alpha}$ -випромінювання). Уточнювали кристалічну структуру сполук методом порошку, деякі – методами порошку і монокристала, використовуючи програму WinCSD [16]. Для підтвердження протяжності твердих розчинів разом з результатами рентгєнівської дифракції враховувалися дані рентгєноспектрального (EDX) аналізу.

За результатами рентгєнофазового та рентгєноспектрального (EDX) аналізів сплавів побудовано ізотермічний переріз діаграми стану системи Y–Hf–Fe при 800°C (рис. 1).

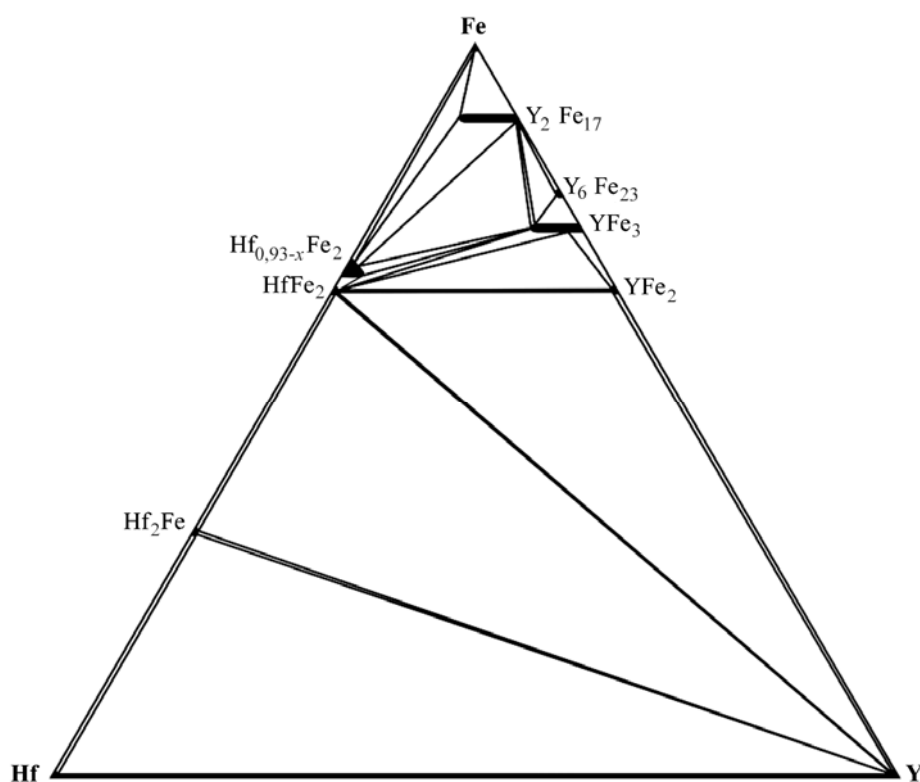


Рис. 1. Ізотермічний переріз діаграми стану системи Y–Hf–Fe при 800°C.

Fig. 1. Isothermal section of the Y–Hf–Fe phase diagram at 800°C.

За температури відпалу 800°C в досліджуваній системі підтверджено існування семи бінарних сполук – Hf $_2$ Fe; α -HfFe $_2$; λ -HfFe $_2$; YFe $_2$; YFe $_3$; Y $_6$ Fe $_{23}$; Y $_2$ Fe $_{17}$ (табл. 1). Тернарних сполук не виявлено. Встановлено межі протяжності твердих розчинів на основі бінарних сполук: Y $_x$ Hf $_{0,93(1)+x}$ Fe $_2$ ($0 \leq x \leq 0,07$) (СТ MgZn $_2$, ПГ $P6_3/mmc$); Y $_{1-x}$ Hf $_x$ Fe $_3$ ($0 \leq x \leq 0,2$) (СТ PuNi $_3$, ПГ $R\bar{3}m$); Y $_{2-x}$ Hf $_x$ Fe $_{17}$ ($0 \leq x \leq 1,3$) (СТ Th $_2$ Ni $_{17}$, ПГ $P6_3/mmc$). Кристалографічні характеристики фаз у системі Y–Hf–Fe подані в таблиці 1. Графіки зміни періодів та об'єму елементарної комірки для твердого розчину Y $_{2-x}$ Hf $_x$ Fe $_{17}$ ($0 \leq x \leq 1,3$) зображено на рис. 2.

Таблиця 1. Кристалографічні характеристики фаз у системі Y–Hf–Fe

Фаза	СТ	СП	ПГ	Періоди ґратки, nm		Літ.
				<i>a</i>	<i>c</i>	
α -Y	Mg	<i>hP2</i>	<i>P6₃/mmc</i>	0,36474	0,57303	[17]
α -Hf	Mg	<i>hP2</i>	<i>P6₃/mmc</i>	0,31883	0,50422	[17]
α -Fe	W	<i>cI2</i>	<i>Im $\bar{3} m$</i>	0,28665		[17]
Hf ₂ Fe	Ti ₂ Ni	<i>cF96</i>	<i>Fd $\bar{3} m$</i>	1,20246 1,2024(1)		[18] *
α -HfFe ₂	MgCu ₂	<i>cF24</i>	<i>Fd $\bar{3} m$</i>	0,7023 0,7021(1)		[18–20] *
β -HfFe ₂	MgNi ₂	<i>hP24</i>	<i>P6₃/mmc</i>	0,4968	1,6167	[20, 21]
λ -HfFe ₂	MgZn ₂	<i>hP12</i>	<i>P6₃/mmc</i>	0,4968	0,8098	[20, 22]
				0,49464(3)	0,80518(8)	*
Y _x Hf _{0,93+x} Fe ₂ , 0 ≤ <i>x</i> ≤ 0,07				0,49440(7)	0,8066(2)	*
YFe ₂	MgCu ₂	<i>cF24</i>	<i>Fd $\bar{3} m$</i>	0,7355 0,73445(3)		[23] *
YFe ₃	PuNi ₃	<i>hR36</i>	<i>R $\bar{3} m$</i>	0,5137 0,5095(1)	2,461 2,439(1)	[24] *
Y _{1-x} Fe ₃ Hf _x , 0 ≤ <i>x</i> ≤ 0,2						
Y ₆ Fe ₂₃	Th ₆ Mn ₂₃	<i>cF116</i>	<i>Fm $\bar{3} m$</i>	1,2084 1,2072(3)		[25] *
α -Y ₂ Fe ₁₇	Th ₂ Ni ₁₇	<i>hP38</i>	<i>P6₃/mmc</i>	0,84659 0,84569(6)	0,83232 0,83095(9)	[22, 26] *
Y _{2-x} Fe ₁₇ Hf _x , 0 ≤ <i>x</i> ≤ 1,3						
β -Y ₂ Fe ₁₇	Th ₂ Zn ₁₇	<i>hR57</i>	<i>R $\bar{3} m$</i>	0,85003	1,24294	[23]

* – результати дослідження.

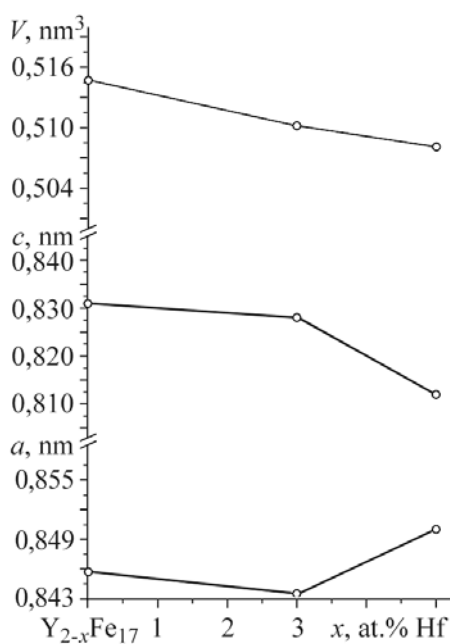


Рис. 2. Зміна періодів та об'єму елементарної комірки для твердого розчину Y_{2-x}Hf_xFe₁₇ (0 ≤ *x* ≤ 1,3).

Fig. 2. Changes of lattice parameters and unit cell volume for the Y_{2-x}Hf_xFe₁₇ (0 ≤ *x* ≤ 1.3) solid solution.

Для фази HfFe₂ характерний концентраційний поліморфізм [18]. За температури відпалу 800°C підтвердили співіснування кубічної фази Лавеса λ_2 -HfFe₂ (СТ MgCu₂, ПГ *Fd $\bar{3} m$*) та гексагональної λ_1 -HfFe₂ (СТ MgZn₂, ПГ *P6₃/mmc*). Методом монокристала уточнили структуру для концентраційної модифікації сполу-

ки λ_1 -HfFe₂, складу Hf_{0,93(1)}Fe₂: СТ MgZn₂, ($a = 0,49440(7)$ nm, $c = 0,8066(2)$ nm, $R1 = 0,022$ ($wR2 = 0,046$)). Координати атомів наведено у табл. 2, результати уточнення – в табл. 3, а значення анізотропних параметрів теплового коливання атомів – у табл. 4.

Таблиця 2. Координати та параметри коливання атомів у структурі Hf_{0,93(1)}Fe₂

Атом	ПСТ	G	x	y	z	U_{eq} / U_{iso}
Hf	$4f$	0,93(1)	2/3	1/3	0,5627(1)	0,0091(8)
Fe1	$6h$	1,00	0,3382(6)	0,1691(3)	1/4	0,0104(4)
Fe2	$2a$	1,00	0	0	1/2	0,0097(9)

Таблиця 3. Кристалохімічні характеристики, деталі зйомки та уточнення кристалічної структури сполуки Hf_{0,93(1)}Fe₂

Емпірична формула	Hf _{0,93(1)} Fe ₂
Структурний тип	MgZn ₂
Просторова група, символ Пірсона	$P6_3/mmc$ (№ 194), $hP22$
Параметри елементарної комірки, a (nm)	0,49440(7)
c (nm)	0,8066(2)
Об'єм елементарної комірки, V (nm ³)	0,17074(5)
Обчислена густина, ρ (cm ⁻³)	11,29
Коефіцієнт абсорбції (cm ⁻¹)	76,79
Розмір кристала (mm ³)	0,12 × 0,07 × 0,05
Випромінювання та довжина хвилі, nm	Mo $K\alpha$, 0,071069
Дифрактометр	Stoe IPDS II
Кількість уточнюваних параметрів	12
Уточнення	F^2
$2\theta_{max}$ та $(\sin \theta / \lambda)_{max}$	57,92; 0,681
h, k, l	$-6 < h < 6; -5 < k < 6; -10 < l < 11$
Кількість рефлексів	1078
Кількість незалежних рефлексів	106 ($R_{int} = 0,033$)
Кількість рефлексів з $I_0 \geq 2\sigma(I_0)$	99 ($R_\sigma = 0,014$)
Кінцевий $R_1^{a/}$ фактор (для всіх даних $R_1^{a/}$)	0,022 (0,026)
Ваговий $wR_2^{b/}$ фактор ($wR_2^{b/}$ для всіх даних)	0,046 (0,048)
Коефіцієнт екстинкції	0,006(1)
Фактор добротності	1,1
Найбільша/найменша залишкова електронна густина (e ⁻ /Å ⁻³)	1,07 / -0,88

Примітка: $a/ - R_1(F) = [\Sigma(|F_o| - |F_c|)] / \Sigma|F_o|$;
 $b/ - wR_2(F^2) = [\Sigma[w(F_o^2 - F_c^2)^2] / \Sigma[w(F_o^2)^2]]^{1/2}$;
 $[w^{-1} = \sigma^2(F_o)^2 + (0,010P)^2 + 7,443P]$, де $P = (F_o^2 + 2F_c^2) / 3$.

Таблиця 4. Анізотропні параметри зсуву атомів (Å²) у структурі Hf_{0,93(1)}Fe₂

Атом	U_{11}	U_{22}	U_{33}	U_{13}
Hf	0,0098(4)	0,0098(4)	0,0118(5)	0,0049(2)
Fe1	0,008(1)	0,008(1)	0,010(1)	0,0042(6)
Fe2	0,010(1)	0,010(1)	0,009(2)	0,0049(6)

Примітка: $U_{23} = U_{13} = 0$.

Аналіз міжатомних відстаней (табл. 5) засвідчує добру кореляцію цих значень із сумами атомних радіусів компонентів.

Таблиця 5. Міжатомні відстані (δ) та координаційні числа (КЧ) атомів у структурі $\text{Hf}_{0,93(1)}\text{Fe}_2$

Атоми	δ (Å)	КЧ	Атоми	δ (Å)	КЧ
Hf1 – 3Fe1	2,888(1)	16	Fe1 – 2Fe1	2,436(4)	12
Hf1 – 6Fe1	2,8971(6)		Fe1 – 2Fe2	2,483(1)	
Hf1 – 3Fe2	2,8989(4)		Fe1 – 2Fe1	2,508(4)	
Hf1 – 4Hf1	3,0283(7)		Fe1 – 2Hf1	2,888(1)	
Fe2 – 6Fe1	2,483(1)	12	Fe1 – 4Hf1	2,8971(6)	
Fe2 – 6Hf1	2,8989(4)				

Серед семи бінарних сполук системи Y–Hf–Fe, показаних на рис. 1, п'ять поглинають водень – це всі сполуки ітрію та Hf_2Fe . Наводнювання HfFe_2 , судячи з ізоструктурності та хімічної спорідненості зі сполукою ZrFe_2 , вимагає тисків суттєво вище 1 кбар. Серед псевдобінарних сполук, які існують в системі Y–Hf–Fe, цікавими є сполуки $(\text{Y}_{1-x}\text{Hf}_x)\text{Fe}_2$, $(\text{Y}_{1-x}\text{Hf}_x)\text{Fe}_3$ та $(\text{Y}_{1-x}\text{Hf}_x)_2\text{Fe}_{17}$. Наводнювали ряди цих сполук за тиску водню 1,2 bar та отримали гідриди волюметрично визначених складів, а саме: $\text{Y}_{0,8}\text{Hf}_{0,2}\text{Fe}_2\text{H}_{2,8}$, $\text{Y}_{0,8}\text{Hf}_{0,2}\text{Fe}_3\text{H}_{2,5}$ та $\text{YHfFe}_{17}\text{H}_{2,9}$. Слід зазначити, що лише для сполуки $\text{Y}_{0,8}\text{Hf}_{0,2}\text{Fe}_3\text{H}_{2,5}$ одержано кристалічний гідрид (рис. 3), інші були фактично повністю аморфізовані. Структурні параметри металеві матриці цього гідриду наведені у табл. 6. В уточненні введено припущення, що гафній заповнює виключно позицію 6c. Таке заповнення дало найкраще узгодження моделі з експериментальними даними.

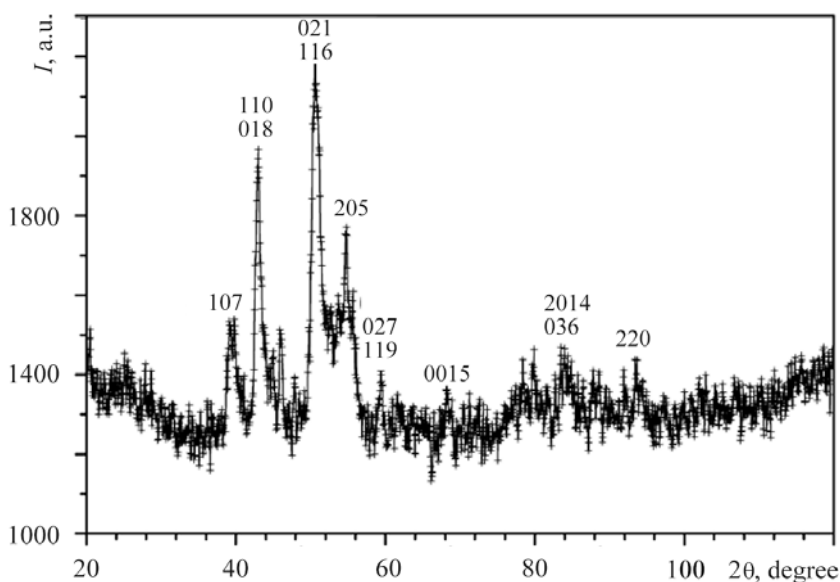


Рис. 3. Дифрактограма гідриду $\text{Y}_{0,8}\text{Hf}_{0,2}\text{Fe}_3\text{H}_{2,5}$ ($\text{CuK}\alpha$ -випромінювання):
 ПГ $R\bar{3}m$, $a = 0,5295(7)$ nm; $c = 2,591(4)$ nm.

Fig. 3. X-ray diffraction pattern for the $\text{Y}_{0,8}\text{Hf}_{0,2}\text{Fe}_3\text{H}_{2,5}$ hydride ($\text{CuK}\alpha$ -radiation);
 SG $R\bar{3}m$, $a = 0.5295(7)$ nm; $c = 2.591(4)$ nm.

Таблиця 6. Структура металевої матриці гідриду $Y_{0,8}Hf_{0,2}Fe_3H_{2,5}$

Атом	Позиція	x	y	z	G	B_{ISO}
Y1	$3a$	0	0	0	1,0(-)	1,00(11)
Y2	$6c$	0	0	0,1381(7)	0,31(2)	1,0(8)
Hf2					0,69(2)	
Fe1	$3b$	0	0	1/2	1,0(-)	1,98(11)
Fe2	$6c$	0	0	0,3279(11)	1,0(-)	1,00(11)
Fe3	$18h$	0,506	$-x$	0,0790(8)	1,0(-)	0,53(10)

Нещодавно досліджували низку псевдобінарних сполук $La_{0,5}Ce_{0,5}Ni_4Co$ [27] та $ZrFe_{1,98}Al_{0,02}$ [28], для яких модифікування складів призводить до суттєвих змін воденсорбційних властивостей, але при цьому кристалічність матеріалу зберігається. Відзначимо, що там відбувається заміна активного гідридотвірного металу La на хімічно споріднений Ce, або заміна неактивних металів Ni на Co або Fe на Al. У досліджуваних матеріалах заміна Ітрію на Гафній призводить до того, що через відмінність властивостей ці метали дають різне розширення комірки в околі кожного атома, що врешті спричиняє втрату кристалічності.

ВИСНОВКИ

Методами рентгенофазового, рентгеноструктурного та локального рентгено-спектрального аналізів досліджено взаємодію компонентів у потрійній системі Y–Hf–Fe та побудовано ізотермічний переріз діаграми стану при 800°C. Встановлено протяжність твердих розчинів заміщення на основі бінарних сполук YFe_3 ($Y_{1-x}Hf_xFe_3$, $0 \leq x \leq 0,2$) та Y_2Fe_{17} ($Y_{2-x}Hf_xFe_{17}$, $0 \leq x \leq 1,3$). Синтезовано ряд насичених гідридів за кімнатної температури та тиску 1 atm. Показано, що більшість гідридів частково чи повністю аморфізуються під час наводнювання. Зокрема, вдалося отримати гідриди складу $Y_{0,8}Hf_{0,2}Fe_2H_{2,8}$ зі структурою типу $MgCu_2$ та $Y_{0,8}Hf_{0,2}Fe_3H_{2,5}$ зі структурою типу $PuNi_3$, для яких встановлено параметри елементарної комірки.

РЕЗЮМЕ. Исследовано взаимодействие компонентов в тернарной системе Y–Hf–Fe и построено изотермическое сечение диаграммы состояния при 800°C. Определено протяжение твердых растворов замещения на основе бинарных соединений YFe_3 ($Y_{1-x}Hf_xFe_3$, $0 \leq x \leq 0,2$) и Y_2Fe_{17} ($Y_{2-x}Hf_xFe_{17}$, $0 \leq x \leq 1,3$). Методом монокристалла впервые изучено кристаллическую структуру соединения $Hf_{0,93}Fe_2$ (СТ $MgZn_2$, ПГ $P6_3/mmc$, СП $hP12$, $a = 0,49440(7)$ nm, $c = 0,80666(2)$ nm). Исследовано водородосорбционные свойства сплавов состава $Y_{1-x}Hf_xFe_2$ – структура фаз Лавеса C15, $Y_{1-x}Hf_xFe_3$ – структурный тип $PuNi_3$ и $(Hf_{1-x}Y_x)_2Fe$ – структурный тип Ti_2Ni .

SUMMARY. Interaction of components in the Y–Hf–Fe ternary system has been studied and isothermal section of the phase diagram at 800°C has been built. The length of substitution solid solutions on the basis of binary YFe_3 ($Y_{1-x}Hf_xFe_3$, $0 \leq x \leq 0,2$) and Y_2Fe_{17} ($Y_{2-x}Hf_xFe_{17}$, $0 \leq x \leq 1,3$) has been determined. The crystal structure of the $Hf_{0,93}Fe_2$ compound (ST $MgZn_2$, SG $P6_3/mmc$, PS $hP12$, $a = 0,49440(7)$ nm, $c = 0,80666(2)$ nm) has been studied for the first time with the use of the single crystal method. Hydrogen absorption properties of alloys of $Y_{1-x}Hf_xFe_2$ (Laves phase structure C15), $Y_{1-x}Hf_xFe_3$ ($PuNi_3$ structure type) and $(Hf_{1-x}Y_x)_2Fe$ (structure type Ti_2Ni) have been studied.

1. Liu Zh., Jin Zh., and Xia Ch. 873 K Isothermal Section of Phase Diagram for Y–Fe–Ti Ternary System // Scripta Materialia. – 1997. – 37. – P. 1129–1134.
2. Gupta K. P. Ni–Ti–Y (Nickel–Titanium–Yttrium) System // J. Phase. Equil. Diff. – 2009. – 30. – P. 402–405.
3. Zinkevich M., Mattern N., and Bacher I. Experimental and thermodynamic assessment of Fe–Gd–Zr system // Z. Metallkd. – 2002. – 93. – P. 186–198.

4. *Huo G. Y.* Phase relation in the Fe-rich region of the Gd–Fe–Ti system at 1373 K // *J. Alloys Compounds*. – 1998. – **268**. – P. 152–154.
5. *Фазові рівноваги в системі Er–Fe–Ti та воденьсорбційні властивості сплавів ErFe_{2-x}M_x (M = Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Mo) / О. М'якуш, Г. Мартинюк, Ю. Вербовицький та ін. // Вісник Львів. ун-ту. Серія хім. – 2006. – 47. – С. 25–30.*
6. *Verbovytsky Yu., Myakush O., and Kotur B.* The Y–Zr–Ni system at 600°C and crystal structure of the R_{0.25}Zr_{0.75}Ni₂ phase // *Тези доп. XVII Українська конф. з неорганічної хімії (15–19 вересня 2008 р.)*. – Львів, 2008. – С. 253.
7. *Myakush O., Myronenko P., and Kotur B.* X-ray investigation of the Y–Zr–Ni at 870 K // *XVI Int. Seminar on Physics and Chemistry of Solids*. – Lviv, 2010. – P. 56.
8. *Burso E. and Teteanu R.* Magnetic properties of (Y_{1-x}Zr_x)Co₃ compounds // *Solid State Commun.* – 1993. – **86**. – P. 493–496.
9. *Kobayashi K. and Kanematsu K.* Magnetic properties and crystal structure of Laves phase (Y_xZr_{1-x})Fe₂ and their hydrides // *J. Phys. Soc. Jpn.* – 1986. – **55**. – P. 1336–1340.
10. *Hydrogen absorption and kinetic studies in Zr_{0.2}Ho_{0.8}Fe₂ / T. R. Kesavan, S. Ramaprabhu, K. V. S. Rama Rao et. al. // J. Alloys Compounds. – 1996. – 244. – P. 164–169.*
11. *Hydrogenation of pseudo-binary Ho_{1-x}M_xFe₂ compound (M = Zr, Hf; 0 < x < 0,2) / I. V. Koval'chuck, A. B. Riabov, O. R. Myakush et al. // Int. Symposium "Metal-Hydrogen Systems. Fundamental and Application". – Moscow, 2010. – P. 180.*
12. *Яртись В. А., Рябов О. Б., Лотоцький М. В.* Матеріалознавство та структурна хімія інтерметалічних гідридів. – Львів, 2006. – 208 с.
13. *Mukai D., Miyata H., and Aoki K.* Hydrogen absorption and desorption properties of Hf-based intermetallic compounds // *J. Alloys Compounds*. – 1999. – **293–295**. – P. 417–420.
14. *Synthesis of novel deuterides in several Laves phases by using gaseous deuterium under higt pressure / S. M. Filipek, V. Paul-Boncour, A. Percheron Guegan et al. // J. of Physic: Condensed Matter. – 2008. – 14, № 44. – P. 11261–11264.*
15. *Sivov R. B., Zotov T. A., and Verbetsky V. N.* Hydrogen sorption properties of ZrFe_x (1.9 ≤ x ≤ 2.5) alloys // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2011. – **36**. – P. 1355–1358.
16. *Use of the CSD program package for structure determination from powder data / L. G. Akselrud, P. Yu. Zavali, Yu. N. Grin et al. // Mater. Sci. Forum. – 1993. – 133–136. – P. 335–340.*
17. *Villars P.* Pearson's Handbook. Desk Edition // *Materials Park (OH). ASM International*. – 1997. – **1, 2**. – P. 2886.
18. *Refinement of the crystal structure of Hf₂Fe / B. Cekic, B. Prelesnik, S. Koicki et al. // J. Less-Common Metals. – 1991. – 171. – P. 9–15.*
19. *Ikeda K.* Crystal structure of Hf-Fe compounds // *Z. Metallkunde*. – 1977. – **68**. – P. 195–198.
20. *Von Keitz A., Sauthoff G., and Neumann P.* Laves Phases for Higt Temperatures-Structure, Stability and Constitution // *Z. Metallkd.* – 1998. – **89**. – P. 803.
21. *Elliot R. P.* Laves type phases of Hafnium // *Trans. Am. Soc. Metals*. – 1961. – Vol. 53. – P. 321–329.
22. *Bushow K. H., van Engen P. G., and Jongenbreur R.* Magneto-optical properties of metallic ferromagnetic materials // *J. Magn. Magn. Mater.* – 1983. – **38**. – P. 1–22.
23. *Dwight A. E.* Factors controlling the occurrence of Laves phases and AB₅ compounds among transition elements // *Trans. ASM*. – 1961. – **53**. – P. 479–500.
24. *Bushow K. H.* Intermetallic compounds of Rare-Earth and 3d transition metals // *Rep. Prog. Phys.* – 177. – **40**. – P. 1179–1256.
25. *Bayer G. and Wallace W.* Thermodynamic, kinetic, structural, and surface studies of Y₆Fe_{23-x}Mn_x alloys and their hydrides // *J. Phys. Chem.* – 1984. – **88**. – P. 3220–3224.
26. *Real disorder crystal structure and Curie temperature of intermetallic compounds Y₂Fe_{17-x}Me_x (M = Si or Al) / V. Voronin, I. Berger, A. Kuchin et al. // J. Alloys and compounds. – 2001. – 315. – P. 82–89.*
27. *Synchrotron diffraction studies and thermodynamics of hydrogen absorption-desorption processes in La_{0.5}Ce_{0.5}Ni₄Co / A. B. Riabov, R. V. Denys, J. P. Maehlen et al. // J. Alloys and compounds. – 2011. – 509. – P. 844–848.*
28. *Higt pressure in situ diffraction studies of metal-hydrogen systems / V. A. Yartys, R. V. Denys, and C. J. Webb // J. Alloys and compounds. – 2001. – 509. – P. 817–822.*

Одержано 21.09.2011