

ДОСЛІДЖЕННЯ СОРБЦІЇ ТА ДЕСОРБЦІЇ ВОДНЮ ЛИТИМИ ТА ШВИДКОЗАГАРТОВАНИМИ СПЛАВАМИ Zr–V

Д. В. ВІНОГРАДОВ¹, М. А. ТИХОНОВСЬКИЙ², І. В. КОЛОДІЙ²,
Ю. П. БОБРОВ², Т. Ю. РУДИЧЕВА²

¹ Науково-виробничий комплекс “Відновлювальні джерела енергії та ресурсозберігальні технології” Національного наукового центру Харківського фізико-технічного інституту НАНУ;

² Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій
Національного наукового центру Харківського фізико-технічного інституту НАНУ

Досліджено процеси поглинання та виділення водню сплавами Zr–V різного складу в литому і швидкозагартованому з розплаву станах. Виявлено, що за характеристиками сорбції-десорбції сплави в литому стані перевершують швидкозагартовані.

Ключові слова: розплав, водень, сорбція-десорбція, спінігування, фази Лавеса, мікроструктура, гідрид.

Сплави Zr–V, головно сполука ZrV_2 (т.зв. фази Лавеса складу AB_2), відомі як сплави-накопичувачі водню (СНВ) [1]. До їх переваг можна віднести високий атомарний вміст водню [2–4], відносно низькі значення температури і тиску початку утворення гідриду [3, 4], високі об’ємний (до 125 kg H_2 на m^3 сплаву) та масовий (від 1,5 до 2,5 mass.%) вміст водню [3]. До недоліків зазвичай відносять підвищену температуру розкладання гідридів на їх основі [5]. Сплави Zr–V можна використати для зберігання водню [6], виготовлення електродів паливних елементів [6], а також як джерела чистого і активного водню [7]. Для цього, як правило, вживають сполуку ZrV_2 , що отримана методом дугового плавлення і має крупнозернисту кристалічну структуру. Відомо [8], що на взаємодію матеріалу з воднем може істотно впливати як його склад, так і структурний стан. Нижче вивчено процеси поглинання і виділення водню сплавами Zr–V різного складу, які перебувають у звичайному крупно- та субмікроструктурному або нанокристалічному станах і отримані швидким гартуванням з розплаву.

Методика випроб. Досліджували чотири складу сплаву: стехіометричний ZrV_2 , сплави, що відрізняються від стехіометрії ($Zr_{0,29}V_{0,71}$ і $Zr_{0,38}V_{0,62}$), а також евтектичний $Zr_{0,6}V_{0,4}$. Вихідні сплави виплавляли в дуговій печі в чистому аргоні, використовуючи невитратний вольфрамовий електрод. Щоб досягти гомогенності, їх переплавляли 3–5 разів, перевертаючи під час кожного переплаву. Отримані зразки важили ~20 g. Загартувували з розплаву методом спінігування на установці “Лента-2М” [9]; лінійна швидкість обертання мідного барабана 25 m/s, товщина швидкозагартованих стрічок біля 200 μm , швидкість охолодження розплаву ~ 10^6 grad/s. Мікроструктуру сплавів вивчали металографічним методом на мікроскопі ММР-4 (збільшення до $\times 1500$). Для виявлення структури шліфи травили розчином: 5 g $FeCl_3$ + 15 ml HCl + 50 ml H_2O). Мікротвердість зразків вимірювали приладом ПМТ-3 за навантаження 50 g.

Водневу ємність сплавів досліджували волюмометричним методом за відомою методикою [10]. У робочу камеру зі зразком напускали водень, нагрівали її і вимірювали залежність тиску H_2 від температури ($P_{max} = 3 \cdot 10^5$ Pa). Швидкозагарт-

Контактна особа: Д. В. ВІНОГРАДОВ, e-mail: vinogradov@kipt.kharkov.ua

товані зразки наводнювали при температурі до 350°C, щоб уникнути істотних змін у їх структурі, зокрема, запобігти кристалізації аморфного складника. Литі зразки наводнювали за температур до 400...450°C. Кількість поглинутого водню визначали як різницю між вмістом напущеного та вільного в газовій фазі після охолодження до кімнатної температури.

Фазовий склад зразків і кристалічну структуру фаз до і після наводнювання вивчали на дифрактометрі ДРОН-2.0 у мідному та заліжному випромінюванні. Масову частку фаз і параметри кристалічної структури визначали методом Рітвельда, а десорбцію водню з наводнених сплавів у вакуумі за підвищення температури – мас-спектрометром MX7203.

Структура і фазовий склад вихідних сплавів. За результатами металографічних досліджень (рис. 1) всі зразки мали двофазну структуру. Розмір зерен для сплаву ZrV_2 , $Zr_{0,29}V_{0,71}$ і $Zr_{0,38}V_{0,62}$ становив $\sim 5...10$ μm . Сплав $Zr_{0,6}V_{0,4}$ – високодисперсна евтектика з невеликою кількістю первинних кристалів. Мікротвердість сплавів $Zr_{0,6}V_{0,4}$, ZrV_2 , $Zr_{0,29}V_{0,71}$, $Zr_{0,38}V_{0,62}$ рівна відповідно 3,30 GPa; 2,68; 2,32 і 2,79 GPa.

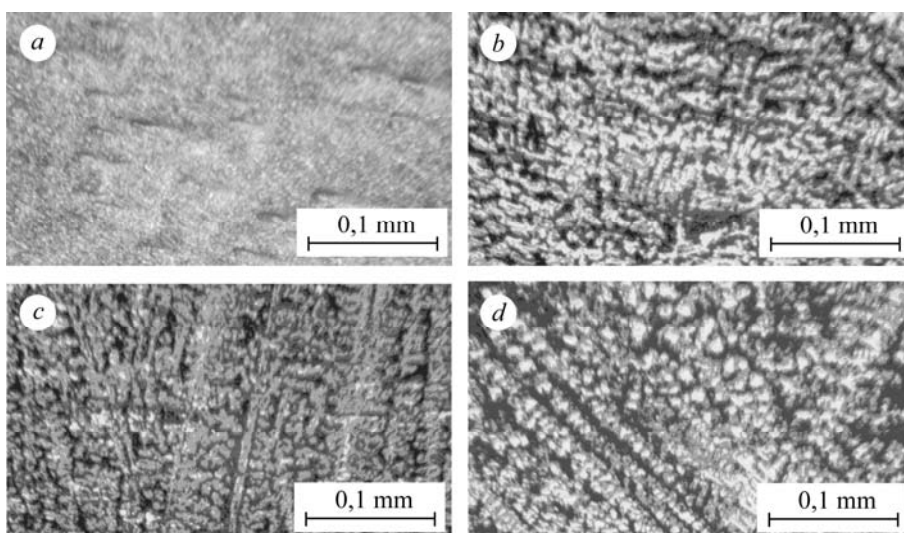


Рис. 1. Мікроструктура литих сплавів: *a* – $Zr_{0,6}V_{0,4}$; *b* – ZrV_2 ; *c* – $Zr_{0,29}V_{0,71}$; *d* – $Zr_{0,38}V_{0,62}$.

Fig. 1. Microstructure of cast alloys: *a* – $Zr_{0,6}V_{0,4}$; *b* – ZrV_2 ; *c* – $Zr_{0,29}V_{0,71}$; *d* – $Zr_{0,38}V_{0,62}$.

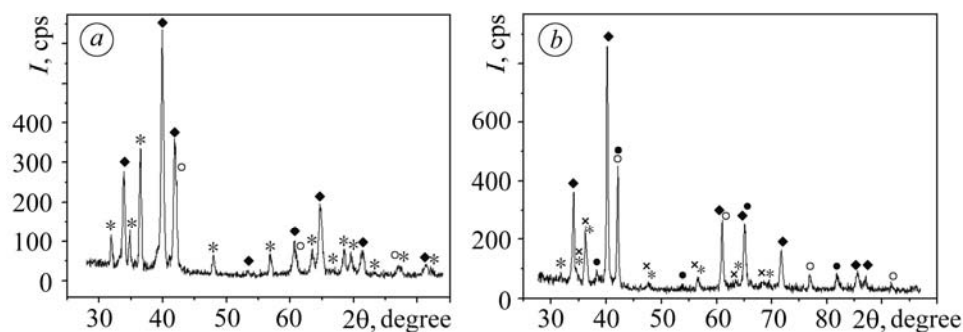


Рис. 2. Дифрактограми сплаву ZrV_2 у литому (*a*) та швидкозагартованому (*b*) станах:

* – α -Zr; ◆ – ZrV_2 (C15); ○ – V; × – α -Zr'; ● – Zr_3V_3O .

Fig. 2. Diffractograms of ZrV_2 alloy in cast (*a*) and fast quenched (*b*) states:

* – α -Zr; ◆ – ZrV_2 (C15); ○ – V; × – α -Zr'; ● – Zr_3V_3O .

Як бачимо, найбільшу мікротвердість має високодисперсний евтектичний сплав $Zr_{0,6}V_{0,4}$. На рис. 2 наведено дифрактограми сплаву ZrV_2 у різних станах, а в табл. 1 – фазовий склад сплавів за результатами дифрактометрії.

Таблиця 1. Фазовий склад сплавів Zr–V

Сплав *	Фаза	Вміст фази, mass. %	Параметр ґратки, Å	$V, \text{Å}^3$	Вміст компонентів сплаву, mass. %
$Zr_{0,6}V_{0,4}$ FQ	α -Zr	12,4	$a = 3,232; c = 5,1493$	46,58	71,9% Zr + + 26,7% V + + 1,4% O
	α -ZrO _{0,22} **	37	$a = 3,252; c = 5,1804$	47,44	
	ZrV ₂ (C15)	50,6	$a = 7,449$	413,33	
$Zr_{0,6}V_{0,4}$ cast	α -ZrO _{0,05} **	47,8	$a = 3,238; c = 5,156$	46,82	72,4% Zr + + 27,6% V
	ZrV ₂ (C15)	52,2	$a = 7,475$	417,67	
$Zr_{0,38}V_{0,62}$ FQ	ZrV ₂ (C15)	55,4	$a = 7,450$	413,49	53,22% Zr + + 46,52% V + + 0,26% O
	ZrV ₂ (C14)	32,7	$a = 5,2896; c = 8,659$	209,81	
	α -ZrO _{0,13} **	11,9	$a = 3,247; c = 5,171$	47,21	
$Zr_{0,38}V_{0,62}$ cast	ZrV ₂ (C15)	91,2	$a = 7,4656$	416,09	51,8% Zr + + 48,2% V
	α -ZrO _{0,04} **	8,8	$a = 3,236; c = 5,156$	46,76	
ZrV_2 FQ	ZrV ₂ (C15)	64	$a = 7,445$	412,66	47,86% Zr + + 51,52% V + + 0,62% O
	V	14,4	$a = 3,0343$	27,94	
	Zr ₃ V ₃ O _{0,67}	9,5	$a = 12,1619$	1798,89	
	α -ZrO _{0,28} **	8,3	$a = 3,262; c = 5,186$	47,79	
	α -Zr	3,9	$a = 3,2324; c = 5,1488$	46,58	
ZrV_2 cast	ZrV ₂ (C15)	74,6	7,488	419,85	46,6% Zr + + 53,4% V
	V	14	3,042	28,15	
	α -ZrO _{0,05} **	11,4	$a = 3,237; c = 5,158$	46,81	
$Zr_{0,29}V_{0,71}$ FQ	ZrV ₂ (C15)	49,9	$a = 7,446$	412,83	36,72% Zr + + 63,15% V + + 0,13% O
	V	36,8	$a = 3,0354$	27,97	
	α -ZrO _{0,06} **	13,3	$a = 3,2408; c = 5,161$	46,94	
$Zr_{0,29}V_{0,71}$ cast	ZrV ₂ (C15)	62,4	$a = 7,477$	418,01	47,2% Zr + + 52,8% V
	V	19,8	$a = 3,0357$	27,98	
	α -ZrO _{0,05} **	17,8	$a = 3,239; c = 5,157$	46,85	

* FQ (fast quenched) – швидкозагартований стан, cast – литий;

** твердий розчин кисню в цирконії.

У результаті швидкого гартування у всіх сплавах, крім $Zr_{0,29}V_{0,71}$, присутній кисень у вигляді компонента фази Zr_3V_3O або як елемент втілення в твердому розчині (α -Zr'). Також, крім фази C15, характерної для литих сплавів, після швидкого гартування з'явилася і фаза C14 у сплавах $Zr_{0,6}V_{0,4}$, $Zr_{0,38}V_{0,62}$.

Поглинання водню. Під час першого нагрівання сплаву у водні до певної температури (температури активації) поглинання не виявили. Далі, після початку поглинання, процес пришвидшувався, досягаючи насичення. Максимальну кількість поглинутого водню зафіксували за кімнатної температури і максимального тиску. Кожний склад має свої температурні зони його активного поглинання. Як

правило, за повторного насичення температура початку активного поглинання зміщувалася в область високих значень. Визначено (табл. 2) параметри поглинання водню різними сплавами, розраховані за результатами волюметрії.

Таблиця 2. Параметри поглинання водню сплавами Zr-V

Сплав	T_{activ} , К	a	V_{rech}	ΔT_1	ΔT_2
		m ³ /kg [mass.%]		К	
Zr _{0,6} V _{0,4} FQ	463	0,272 [2,42]	0,096,4 [0,858]	333...373	363...423
ZrV ₂ FQ	573	0,196 [1,74]	0,096,1 [0,855]	463...533	473...523
Zr _{0,38} V _{0,62} FQ	> 623	0,221 [1,97]	0,139 [1,24]	473...623	473...623
Zr _{0,29} V _{0,71} FQ	373	0,230 [2,05]	0,082,1 [0,73]	423...303	483...573
Zr _{0,6} V _{0,4} cast	573	0,288 [2,56]	0,149 [1,33]	573...623	423...473
ZrV ₂ cast	623	0,275 [2,45]	0,027 [0,24]	523...698	573...623
Zr _{0,38} V _{0,62} cast	593	0,273 [2,43]	0,161 [1,43]	573...673	–
Zr _{0,29} V _{0,71} cast	453	0,304 [2,70]	0,146 [1,30]	453...303	423...573

T_{activ} – температура активації сплаву; a – кількість поглинутого сплавом водню; V_{rech} – кількість водню, поглинутого сплавом після регенерації впродовж 2 h при 623К; T_1, T_2 – зони активного поглинання водню після першого наводнювання і регенерації.

Необхідно зауважити, що сплав Zr_{0,38}V_{0,62} (швидкозагартований) активувався при $T > 623$ К, тобто його структура частково змінювалася порівняно з вихідним станом. Кількість поглинутого водню після регенерації менша, ніж за початкового напуску (табл. 2), що свідчить про те, що у першому випадку він десорбувався неповністю. Використовуючи криві сорбції-десорбції, розрахували ізотерми поглинання водню (рис. 3).

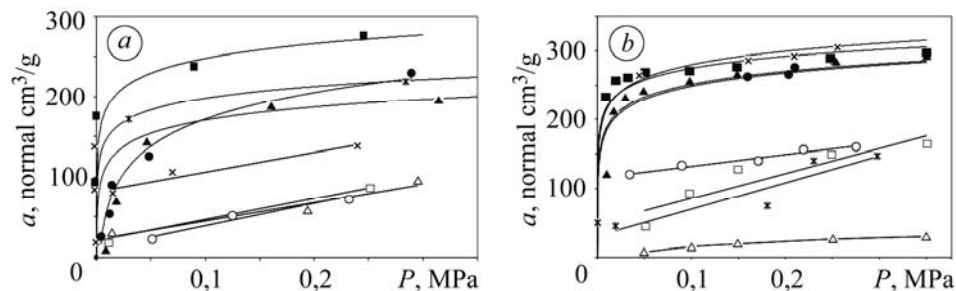


Рис. 3. Ізотерми поглинання водню швидкозагартованими (а) та литими (b) сплавами Zr_{0,6}V_{0,4}, ZrV₂, Zr_{0,38}V_{0,62}, Zr_{0,29}V_{0,71}: ■, ▲, ●, ◆ – перше наводнювання ; □, △, ○, ◇ – після регенерації у вакуумі впродовж 2 h при 623 К.

Fig. 3. Isotherms of hydrogen sorption of fast quenched (a) and cast (b) alloys Zr_{0,6}V_{0,4}, ZrV₂, Zr_{0,38}V_{0,62}, Zr_{0,29}V_{0,71}: ■, ▲, ●, ◆ – initial hydrogen sorption ; □, △, ○, ◇ – hydrogen sorption after regeneration under vacuum 2 h at 623 K.

Структура та фазовий склад наводнених сплавів. На рис. 4 наведені характерні дифрактограми сплаву після насичення воднем, а в табл. 3 наведено фазовий склад та характеристики кристалічної структури фаз (параметри кристалічної ґратки a, c та об'єм елементарної комірки V). Крім того, вказано масову частку фаз та загальний вміст водню в сплаві після насичення.

Масовий вміст водню, отриманий за рентгенографічним аналізом, якісно збігається з результатами розрахунку за залишковим тиском (див. табл. 2). Кількісну відмінність можна пояснити тим, що у першому випадку вивчали тільки частину зразка, який може бути неоднорідним за складом. Крім того, в деяких випадках зразки подрібнювали на порошок, що може викликати часткову десорбцію водню.

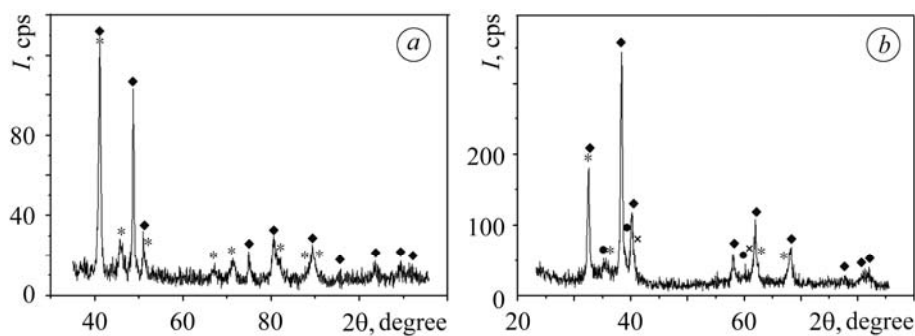


Рис. 4. Дифрактограми зразків наводнених сплавів ZrV_2 у литому (а) та швидкозагартованому (b) станах (а: * – ZrH_2 ; ◆ – $ZrV_2H_{4,4}$; * – ZrH_2 ; b: ◆ – $ZrV_2H_{3,5}$; × – $V_2H_{0,8}$; ● – $Zr_3V_3O_{0,67}H_{9,6}$).

Fig. 4. Diffractograms of ZrV_2 alloys after hydrogen sorption in cast (a) and fast quenched (b) states (a: * – ZrH_2 ; ◆ – $ZrV_2H_{4,4}$; * – ZrH_2 ; b: ◆ – $ZrV_2H_{3,5}$; × – $V_2H_{0,8}$; ● – $Zr_3V_3O_{0,67}H_{9,6}$).

Таблиця 3. Характеристики сплавів Zr–V після наводнювання

Сплав	Фаза	Вміст фаз, mass. %	Параметр ґратки фаз, Å	V_2 , Å ³	Вміст H ₂ , mass. %
$Zr_{0,6}V_{0,4}$ FQ	$ZrV_2H_{4,6}$	64,3	$a = 7,9304$	498,75	2,26
	ZrH_2	22,2	$a = 3,5187$ $c = 4,451$	55,11	
	ZrH_2 (з киснем)	13,5	$a = 3,578$ $c = 4,483$	57,68	
$Zr_{0,6}V_{0,4}$ cast	$ZrV_2H_{4,6}$	88,2	$a = 7,957$	503,79	2,32
	ZrH_2	11,8	$a = 3,525$ $c = 4,494$	55,84	
$Zr_{0,38}V_{0,62}$ FQ	$ZrV_2H_{4,32}$	100	$a = 7,835$	480,97	1,97
$Zr_{0,38}V_{0,62}$ cast	$ZrV_2H_{4,6}$	84	$a = 7,9473$	501,95	2,32
	ZrH_2	16	$a = 3,5197$ $c = 4,4511$	55,14	
ZrV_2 FQ	$ZrV_2H_{3,5}$	74,4	$a = 7,7911$	472,93	1,73
	$Zr_3V_3O_{0,6}H_{9,6}$	9,5	$a = 13,026$	2210,21	
	$V_2H_{0,8}$	10,6	$a = 6,005$ $c = 6,672$	240,59	
	ZrH_2	5,5	$a = 3,5202$ $c = 4,5288$	56,14	
ZrV_2 cast	$ZrV_2H_{4,4}$	67,5	$a = 7,932$	499,05	2,2
	ZrH_2	32,5	$a = 3,521$ $c = 4,4511$	55,18	
$Zr_{0,29}V_{0,71}$ FQ	$ZrV_2H_{4,5}$	75,3	$a = 7,9175$	496,32	2,00
	$V_2H_{0,85}$	18,5	$a = 6,003$ $c = 6,8248$	245,94	
	ZrH_2	6,2	$a = 3,518$ $c = 4,454$	55,12	
$Zr_{0,29}V_{0,71}$ cast	$ZrV_2H_{4,52}$	81,8	$a = 7,947$	501,89	2,18
	ZrH_2	11,4	$a = 3,5187$ $c = 4,4509$	55,11	
	V_2H	6,8	$a = 6,035$ $c = 6,874$	250,36	

Порівнюючи табл. 1 та 3, можна зробити висновок, що фази C14 і C15 під час наводнення повністю переходили у фазу ZrV_2H_x , фаза Zr_3V_3O перетворювалася на $Zr_3V_3O_{0,6}H_x$, а Zr та V частково утворювали бінарні гідриди ZrH_2 та V_2H , а частково переходили у фазу ZrV_2H_x . У всіх випадках литі сплави поглинали дещо більше водню, ніж швидкозагартовані. Це можна пояснити тим, що в останніх є більше кисню, який перешкоджає проникненню водню. Крім того, під час наводнення у деяких швидкозагартованих сплавах виявили фазу $V_2H_{0,8}$, чого не спостерігали у литих сплавах.

Дослідження десорбції наводнених сплавів. Мас-спектрометричні дані (табл. 4) про кількість водню, що виділився під час нагрівання наводнених зразків у вакуумі до температури 900°C , якісно відповідають результатам оцінки вмісту поглинутого водню волюмометричним методом (див. табл. 2). Кількісну відмінність можна пояснити тим, що для мас-спектрометрії використовували близько $0,01\text{ g}$ наводненого сплаву, який може бути неоднорідним за складом.

Таблиця 4. Кількість водню, десорбованого під час нагрівання у вакуумі до температури 900°C

Сплав*	H_2 , mass. %
$Zr_{0,6}V_{0,4}$	2,38 / 1,758
ZrV_2	2,308 / 1,16
$Zr_{0,38}V_{0,62}$	2,86 / 2,4
$Zr_{0,29}V_{0,71}$	2,97 / 2,776

* – у чисельнику – cast; у знаменнику – FQ.

На рис. 5 побудовано криві десорбції водню зі сплавів під час нагрівання у вакуумі. Як бачимо, в литих сплавах піки десорбції розташовані здебільш в порівняно низькому температурному інтервалі $573\dots723\text{ K}$. Згідно з літературними даними [1], фаза ZrV_2H_x для $x = 3\dots5$ втрачає стабільність приблизно при тих самих температурах. Отже, можна вважати, що піки за низьких температур у литих сплавах, ймовірно, відповідають десорбції водню з фази ZrV_2H_x . У швидкозагартованих вони зміщені до вищих температур ($623\dots823\text{ K}$). Враховуючи близький фазовий склад, підвищення температури початку десорбції можна пояснити меншим вмістом водню у фазі ZrV_2H_x . Крім того, різницю у температурі початку десорбції може викликати кисень, присутній у швидкозагартованих сплавах, який може розташовуватися як межами зерен, блокуючи дифузію водню, так і в позиціях втілення, зменшуючи можливість його накопичення.

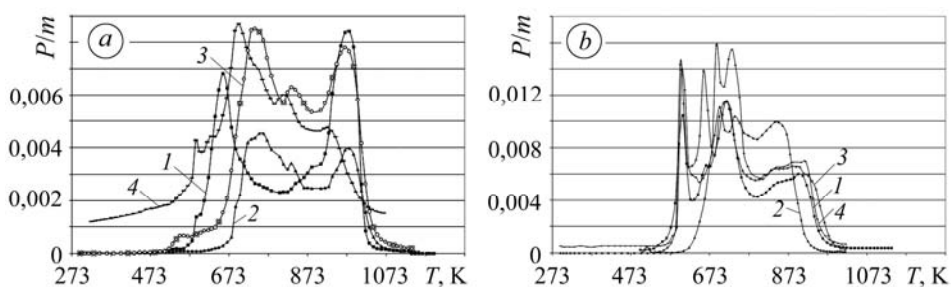


Рис. 5. Температурні криві десорбції водню зі швидкозагартованих (a) та литих (b) сплавів: 1 – $Zr_{0,6}V_{0,4}$; 2 – ZrV_2 ; 3 – $Zr_{0,38}V_{0,62}$; 4 – $Zr_{0,29}V_{0,71}$; P – тиск водню; m – маса зразка.

Fig. 5. Temperature dependences of hydrogen desorption for fast quenched (a) and cast (b) alloys: 1 – $Zr_{0,6}V_{0,4}$; 2 – ZrV_2 ; 3 – $Zr_{0,38}V_{0,62}$; 4 – $Zr_{0,29}V_{0,71}$; P – relative pressure; m – sample mass.

Звернемо увагу також на пік при 973 K у швидкозагартованих сплавах. Автори праці [11] близькі значення температури відносять до розпаду гідриду ZrH_2 , який є у більшості з цих сплавів після насичення воднем. Імовірно, що розпад фази ZrV_2H_x під час нагрівання також може призвести до формування фази ZrH_2 .

Зауважимо, що у литих зразках цей пік зміщений в область нижчих температур 823...923 К. Можливо, і тут це пов'язано з різним вмістом кисню. Піки при 723...773 К присутні і в швидкозагартованих, і литих сплавах і можуть бути ознакою фазового переходу $\alpha \rightarrow \beta$, який згідно з результатами праці [5], відбувається при температурі ~ 743 К.

ВИСНОВКИ

Сплави Zr–V активно поглинають водень за досить низького його тиску (0,05 МПа і нижче). Структурний стан, а точніше метод отримання, відіграє важливу роль у визначенні параметрів їхньої взаємодії з воднем. Як за загальною кількістю поглинутого водню, так і за температурними інтервалами його поглинання і виділення швидкозагартовані з розплаву сплави поступаються литим. Це досить несподіваний результат, враховуючи існуючі уявлення про вплив дисперсності структури на взаємодію матеріалу з воднем [8], а також експериментальні дані про вплив розміру зерен на поглинання водню цирконієм [12]. Причиною цього, на наш погляд, є досить високий вміст кисню в швидкозагартованих сплавах, який поглинається з атмосфери камери під час спінігування. Серед литих сплавів стехіометричний склад ZrV_2 , що найчастіше використовують як накопичувач водню, за різними параметрами не є оптимальним. Дещо кращі характеристики мають сплави до- і застехіометричного складу $Zr_{0,38}V_{0,62}$ та $Zr_{0,29}V_{0,71}$, які можна рекомендувати для використання у водневих технологіях.

РЕЗЮМЕ. Исследованы процессы поглощения и выделения водорода сплавами Zr–V различного состава, которые находятся в литом и быстрозакаленном из расплава состояниях. Выявлено, что по характеристикам сорбции-десорбции сплавы в литом состоянии превосходят быстрозакаленные.

SUMMARY. The processes of hydrogen absorption and desorption by cast and fast quenched Zr–V alloys are investigated. It is shown that the characteristics of sorption-desorption-cast alloys are better than such for fast quenched Zr–V alloys.

1. Богданова А. Н. Фазовые превращения в концентрированных твердых растворах водорода на основе ZrV_2 и HfV_2 : Автореф. дисс. к.ф.-м.н. – М., 2006.
2. Сивов Р., Зотов Т., Вербецкий В. Новые сплавы-накопители водорода на основе $ZrFe_2$ с высоким давлением диссоциации гидридов // ISJAEE. – 2010. – № 5(85). – С. 13–20.
3. Вербецкий В., Митрохин С. Гидриды интерметаллических соединений – синтез, свойства и применение для аккумуляторов водорода // Там же. – 2005. – № 10(30). – С. 41–61.
4. Воденьсорбційні властивості сплавів на перетинах ZrV_2 – $ZrAl_2$ та ZrV_2 – $ZrGa_2$ / О. Курило, Ю. Вербовицький, О. Мякуш та ін. // Вісник Львівськ. ун-ту. Сер. хім. – 2009. – Вип. 50. – С. 126–132.
5. Колачев Б. А., Шалин Р. Е., Ильин А. А. Сплавы-накопители водорода: Справ. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
6. Гапонцев А., Кондратьев В. Диффузия водорода в неупорядоченных металлах и сплавах // Успехи физ. наук. – 2003. – 173, № 10. – С. 1107–1129.
7. Applications of Zr–V hydrogen getters in vacuum-plasma devices: Phase-structural and hydrogen sorption characteristics / M. Lototsky, V. Yartys, Ye. Klochko et al. // J. of Alloys and Compounds. – 2005. – Vol. 404–406. – P. 724–727.
8. Материали для хранения водорода: анализ тенденций развития на основе данных об информационных потоках “ВАНТ” / В. М. Ажажа, М. А. Тихоновский, А. Г. Шепелев и др. // Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2006. – № 1(15). – С. 145–152.
9. Структура и свойства быстрозакаленных циркониевых сплавов “ВАНТ” / А. Бовда, А. Дмитренко, Д. Малыхин и др. // Там же. – 2007. – № 4. – С. 173–178.
10. Поглощение и выделение водорода сплавом $Zr_{0,8}Ti_{0,2}Mn_{0,74}Fe_{1,26}$ “ВАНТ” / В. М. Ажажа, Д. В. Виноградов, В. Г. Колобродов, М. А. Тихоновский // Там же. – 2007. – № 6. – С. 156–160.
11. Гидрирование титана и разложение их гидридов / П. Бережко, И. Тарасова и др. http://www.sjaee.hydrogen.ru/pdf/11_06_Berezhko.pdf ISJAEE. – 2006. – № 11(43). – С. 47–56.
12. Влияв структурного стану цирконію на параметри сорбції-десорбції водню / В. М. Воеводін, Д. В. Виноградов, М. А. Тихоновський, І. В. Колодій, О. М. Бовда // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – 49, № 1. – С. 66–71.

Одержано 09.07.2013