

ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДАККУМУЛИРУЮЩЕГО СПЛАВА TiFe И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ГИДРИДНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

В. П. Мордовин, С. В. Куцев

В работе представлены результаты разработки технологии получения водородаккумулятирующего сплава TiFe. Проведено сравнение структуры и свойств сплавов TiFe, полученных методами литейного производства и порошковой металлургии. Наибольшую сорбционную емкость по водороду и стабильность свойств показал сплав, полученный методом дуговой плавки в вакууме с расходуемым электродом. Рассмотрено применение сплава TiFe в гидридной холодильной установке.

Ключевые слова: водород, сплав, гидрид, сорбционная емкость, холодильная установка

Введение

Водород является одним из наиболее энергоемких топлив, его удельная теплота сгорания почти в 3 раза выше, чем нефтяных моторных топлив и составляет 120 МДж/кг. Положительным качеством водорода и продуктов его сгорания является также их высокая экологическая чистота. К недостаткам водорода относятся его малая плотность ($\sim 0,09$ кг/м³ при нормальных условиях) и повышенные пожаро- и взрывоопасность. Это усугубляется высокой вероятностью утечки водорода, особенно при повышенных давлениях и температурах. В связи с этим его хранение является актуальной проблемой.

Пути решения проблемы хранения водорода сводятся к трем основным способам: в баллонах под давлением (баллонный или компримированный способ), в жидком состоянии (криогенный способ) и в виде различных соединений водорода, в том числе с переходными и щелочноземельными металлами (металлогидридный способ).

Основным недостатком баллонного способа является относительно низкая плотность водорода. Она может быть повышена путем увели-

чения давления водорода в баллоне, но при этом будет увеличиваться опасность такой системы хранения водорода. Это может быть связано как с возможными утечками водорода через различные уплотнения, так и с водородной коррозией контактирующих с ним материалов.

Хранение жидкого водорода из-за его очень низкой критической температурой ($-239,81$ °C) связано с неизбежными и довольно значительными потерями вследствие его испарения. Это, а также большие энергозатраты на охлаждение водорода делают криогенный способ его хранения очень дорогим.

Наиболее безопасным является металлогидридный способ, так как основная часть водорода связана с металлической матрицей силами химической связи.

Кроме того, водородаккумулятирующие материалы металлогидридного типа позволяют осуществлять более компактное аккумулятирование водорода по числу атомов в единице объема по сравнению с другими указанными способами [1]. При этом, используя в качестве таких материалов интерметаллиды, имеется возможность быстрого смещения равновесия реакции

их взаимодействия с водородом при небольшом изменении внешних условий – температуры и давления водорода. Это позволяет рассматривать такие материалы как удобные, обратимо действующие «аккумуляторы водорода» [2]. При этом выделяющийся из гидридных фаз водород содержит не более 0,001 % газообразных примесей [3].

Наибольшее развитие среди титановых водородоаккумулирующих сплавов получили сплавы на основе соединения TiFe [4]. Один моль этого соединения поглощает почти два моля атомарного водорода, что позволяет ему аккумулировать водород с плотностью протонов, превышающей примерно в 1,5 раза аналогичный показатель для жидкого водорода. Процессы гидридообразования осуществляются при температурах, близких к комнатной, при давлении водорода порядка 1 МПа и выше. Порошкообразный гидрид на основе TiFe не пирофорен, и, как показали довольно широкие исследования, безопасен в работе [1].

Для проведения опытно-конструкторских работ с применением водородоаккумулирующего соединения TiFe в различных областях водородной энергетики и машиностроения требуется выпуск укрупненных партий этого материала. В этой связи становится актуальной разработка эффективных и экономичных опытных и опытно-промышленных технологий получения интерметаллида TiFe.

Целью данной работы является исследование разработанной опытно-промышленной технологии получения сплава TiFe и возможности его применения в качестве сорбента водорода в гидридной холодильной установке.

Постановка задачи

Интерметаллическое соединение TiFe содержит химически активный титан (50 ат.%). Получение такого материала методом плавления возможно с применением следующих видов плавки в вакууме или инертной атмосфере: индукционной, дуговой с нерасходуемым или расходуемым электродом, гарнисажной и электронно-лучевой.

Принципиально иным способом получения интерметаллида TiFe является прессование и спекание исходных порошков титана и железа высокой чистоты в электропечах в вакууме, в инертном газе или в водороде. В течение многих лет эти работы проводятся в Институте

проблем материаловедения АН УССР, а теперь НАН Украины. В этой связи интересно сопоставление различных способов получения этого материала как методами литейного производства, так и методами порошковой металлургии с целью определения наиболее эффективных из них.

Сплав TiFe с наиболее высокими сорбционными характеристиками предназначался для апробации в гидридной холодильной установке.

Материалы и методика эксперимента

В данной работе исследовались следующие способы получения сплава TiFe: индукционная плавка, дуговая плавка с нерасходуемым и расходуемым электродами.

В качестве шихтовых материалов использовались иодидный титан, армко-железо и сталь марки СтЗсп.

Химический анализ по металлическим компонентам осуществлялся рентгенофлуоресцентным методом. Кислород и азот определялись методом высокотемпературной экстракции в несущем газе (гелии) на газоанализаторе ТС-600 (*Leco*).

Рентгенофазовый анализ проводился с помощью дифрактометра ДРОН-3М (Cu-K_α -излучение). Сравнение производилось с базой данных *PDF (Powder Diffraction File)*.

Микроструктурные исследования были проведены с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ) *LEO-1420* с рентгеновским микроанализатором («Карл Цейс», ФРГ).

Взаимодействие с водородом исследовалось на установке, позволяющей применять давление водорода до 10 МПа и температуру до 400 °С. В работе использовался технический водород марки «Б» по ГОСТ 3022–80 (99,96 %). Давление водорода измерялось образцовым манометром типа МО модели 1231 (класс точности – 0,4).

Для определения сорбционной емкости был использован метод прямой абсорбции водорода, согласно которому количество поглощенного водорода определяется по уравнению состояния газа в зависимости от изменения его давления в системе известного объема. В значениях сорбционной емкости объем поглощенного водорода приведен к нормальным условиям.

Для определения сорбционной емкости сплав TiFe массой 0,05 кг помещался в специальный

реактор для гидрирования и активировался путем прогрева в вакууме при температуре 350–400 °С для дегазации адсорбированных примесей. Затем, когда температура достигала указанного уровня, в систему подавался водород под давлением 0,7 МПа. Через 30 мин водород откачивался и реактор охлаждался до комнатной температуры, после чего водород снова запускался в реактор под давлением 6 МПа. Если реакция не происходила в течение нескольких минут, вся процедура повторялась [5]. После прохождения реакции гидрирования проводилось несколько контрольных насыщений сплава TiFe водородом (обычно 2–3), и после достижения воспроизводимости результатов сплав считался активированным. После этого определялась сорбционная емкость при необходимых давлениях водорода и температурах.

Получение сплава TiFe несколькими способами

Индукционная плавка. Сплавление компонентов (нарубленные иодидный титан и армко-железо) осуществлялось в вакууме с остаточным давлением 0,133 Па с использованием графитового тигля. При этом типе плавки обеспечивается хорошее перемешивание компонентов, что позволяет получить точный состав сплава. Результаты химического анализа на содержание железа, сделанного для трех проб, взятых из верхней, средней и нижней частей слитка, показали отклонения, не превышающие 1 %. Однако из-за применения графитового тигля сплав оказался насыщенным углеродом, содержание которого составило 0,6 %. Поскольку углерод подавляет процесс гидрирования [6],

снизилась сорбционная емкость материала, полученного указанным методом.

Сплав, полученный индукционной плавкой, был активирован по методике, изложенной выше [5], и после проведения пяти циклов «сорбция–десорбция» водорода результаты по сорбционной емкости стали воспроизводимыми. Сорбционная емкость при сорбции водорода составила $E_c = 170–175$ дм³/кг при давлении водорода $p_{H_2} = 3$ МПа и температуре $T = 20$ °С.

Часть этого материала была передана в Институт газа Академии наук Украины для проведения параллельных испытаний, результаты которых приведены в табл. 1 [7]. Температура десорбции водорода во всех случаях равна 400 °С.

В таблице 1 даны результаты емкости по четвертому циклу «сорбция–десорбция». Емкость E_c определялась по падению давления в замкнутой калиброванной емкости, емкость при десорбции E_d – по выделению водорода при нагреве гидрида до 400 °С и измеренному его количеству с помощью газового счетчика.

Представленные в табл. 1 данные показывают совпадение результатов по E_c при $p_{H_2} = 3$ МПа и $T = 20$ °С, полученных авторами статьи и сотрудниками Института газа Академии наук Украины.

Из таблицы 1 также видно, что при увеличении температуры сорбционная емкость сплава TiFe снижается, что соответствует его экзотермическому взаимодействию с водородом.

Дуговая плавка с нерасходуемым электродом. Этот вид плавки применяется в лабораторных условиях для получения небольших образцов сплавов (до 0,5 кг). Он характеризуется относительно большим отклонением химического со-

Таблица 1

Сорбционная емкость сплава TiFe при индукционной плавке

Номер опыта	Условия сорбции		E_c , дм ³ /кг	E_d , дм ³ /кг
	T , °С	p_{H_2} , МПа		
1	60	6	144	145
2	40	3	150	150
3	40	4	152	148
4	40	5	150	153
5	20	2	163	165
6	20	3	175	179
7	20	4	178	176
8	20	5	176	180
9	0	1	176	175
10	0	2	179	180
11	0	3	177	176

става сплава от расчетного из-за затрудненного перемешивания компонентов, однако ввиду небольшого объема слитков эти отклонения не превышали 2 %. Образцы сплавов получали с помощью вольфрамового нерасходуемого электрода на медном водоохлаждаемом поду в атмосфере очищенного аргона. В качестве исходных компонентов использовали иодидный титан и армко-железо.

В связи с тем, что титан является сильным геттером, особенно по отношению к кислороду, был проведен эксперимент по влиянию условий изготовления TiFe на количество поглощенного водорода. Именно с этой целью применялся данный вид плавки.

Образцы сплава были приготовлены в условиях различного предварительного вакуума. После плавки с предварительным (до запуска аргона) вакуумом с остаточным давлением не выше 0,013 Па содержание кислорода в сплаве составляло 0,01–0,02 мас.%. Сплавы, полученные после плавки с предварительным вакуумом, характеризующимся остаточным давлением не менее 1,33 Па, содержали 0,1 мас.% кислорода. Измерение количества поглощенного водорода этими сплавами в одинаковых условиях при $p_{H_2} = 4,5$ МПа и $T = 20$ °С показало, что в первом случае поглощается около 1,75 мас.% водорода, что соответствует сорбционной емкости $E_c = 215$ дм³/кг, а во втором – не более 1,65–1,67 мас.% водорода ($E_c = 202$ – 205 дм³/кг). Содержание значительного количества кислорода может сильно подавить способность сплава активироваться и поглощать водород.

Дуговая плавка с расходуемым электродом. Этот вид плавки применялся для получения опытной партии материала TiFe в опытно-промышленных условиях. Плавки проводили в универсальной дуговой вакуумной печи типа *L200h* фирмы «Лейбольд Гереус» (ФРГ).

Таблица 2
Химический анализ соединения TiFe,
полученного
в опытно-промышленных условиях

Номер слитка	Место пробы в слитке	Содержание Fe, мас.%
1	Верх	52,15
	Середина	54,50
	Низ	53,93
2	Верх	52,21
	Середина	52,73
	Низ	53,89

Расходуемый электрод диаметром 90 мм собирался из прутков иодидного титана и стали марки СтЗсп. Возможность использования этой стали вместо чистого железа подтверждена испытаниями по определению сорбции водорода сплавами. Остаточное содержание углерода в сплаве, полученного таким образом, не превышает 0,1 мас.%. Плавка проводилась в вакууме с остаточным давлением 0,013 Па в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе диаметром 150 мм и высотой 280 мм с включенной тигельной катушкой, обеспечивающей активное перемешивание всего объема расплавленного металла. Диаметр полученных слитков 150 мм, высота 250 мм. Пробы на химический анализ были взяты из верхней, средней и нижней частей слитков (табл. 2).

Как видно из данных анализа, содержание железа в сплаве практически укладывается в пределы, отвечающие области гомогенности соединения TiFe (51,5–54,0 мас.% Fe) [8].

Рентгенофазовый анализ показал следующий состав полученного сплава: TiFe – 99,01 %, ϵ -Fe-Ti-O – 0,99 %.

Сорбционная емкость по водороду интерметаллида TiFe, полученного по данной технологии, составила $E_c = 226$ дм³/кг при $p_{H_2} = 5,3$ МПа и $T = 20$ °С.

Часть материала была передана для апробирования в качестве аккумулятора водорода в Институт проблем машиностроения Академии наук Украины. При проведении ресурсных испытаний было установлено, что после хранения материала на воздухе в течение двух лет и проведения 1000 циклов «сорбция–десорбция» водорода сорбционная емкость сплава при $p_{H_2} = 3$ МПа и $T = 20$ °С составила $E_c = 198$ дм³/кг, $E_d = 197$ дм³/кг [7].

Результаты исследований

В таблице 3 приведены результаты испытаний материалов на основе TiFe, полученных разными методами [7]. Наилучшие результаты из них имеют образцы, полученные двумя методами: прессованием и спеканием в среде чистого водорода (оптимальный режим), а также дуговой плавкой с расходуемым электродом. Можно считать, что материал, полученный дуговой плавкой, имеет достаточно высокие и стабильные сорбционные характеристики, определенные после хранения слитков на воздухе в течение двух лет, что обычно приводит

к их окислению и снижению сорбционной емкости. Последующее проведение 1000 циклов «сорбция–десорбция» водорода может привести к частичному гидрогенолизу, т.е. к распаду соединения TiFe под влиянием водорода с образованием TiH₂ и Fe, что также вызовет снижение сорбционной емкости из-за высокой стабильности TiH₂.

Эталонный образец, полученный индукционной плавкой, несмотря на то, что содержит в своем составе только фазу TiFe, имеет пониженную сорбционную емкость (E_c и E_d) из-за высокого содержания углерода (0,6 %) в твердом растворе. Также из табл. 3 видно, что плавленные образцы характеризуются пониженной активируемостью, на что указывают высокие значения номера цикла, при котором достигается максимальная емкость. Обращает на себя внимание то, что спеченный в полупромышленных условиях образец имеет существенно более низкие свойства, чем опытно-промышленный образец, полученный дуговой плавкой, который к тому же прошел ресурсные испытания. Была выпущена опытно-промышленная партия этого сплава в количестве 500 кг.

Слитки сплава TiFe, полученные дуговой плавкой с расходуемым электродом, имели крупнозернистое строение. Зерна были сильно вытянуты в направлении теплоотвода (рис. 1). При раскалывании слитка вскрывались усадочные раковины иногда довольно большого размера (до половины толщины слитка).

Перед загрузкой в реактор для гидрирования куски, полученные после раскалывания слитка,

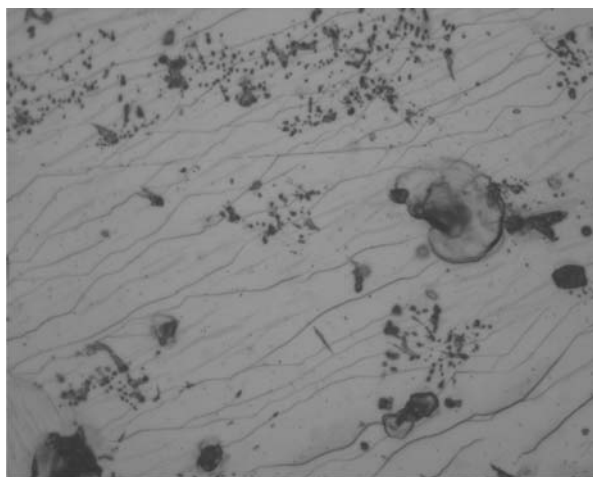


Рис. 1. Микроструктура сплава TiFe, полученного дуговой плавкой с расходуемым электродом, Ø 150 (× 100)

дробились до частиц, размеры которых изменялись в широких пределах (рис. 2) – от самых мелких (около 10 мкм), до крупных размером более 1,5 мм (рис. 3).

По результатам анализа методом высокотемпературной экстракции общее содержание кислорода и азота в дробленном образце сплава TiFe составило: O – 0,033 мас. %; N – менее 0,01 мас. %.

На рисунке 4 показаны результаты элементного анализа, полученные с помощью рентгеновского микроанализатора к РЭМ LEO-1420, с поверхности того же образца (см. рис. 1–3) с глубиной проникновения до 150 Å. Сравнение этих результатов с данными химического анализа, которые приведены в табл. 2, показывает заметно заниженное содержание

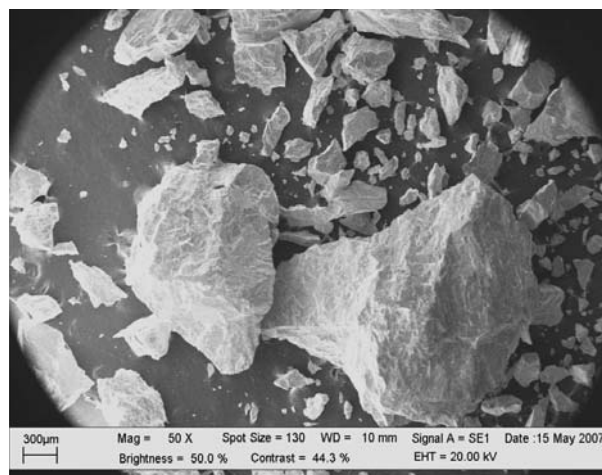


Рис. 2. Дробленный сплав TiFe, полученный дуговой плавкой с расходуемым электродом, Ø 150 (× 50)

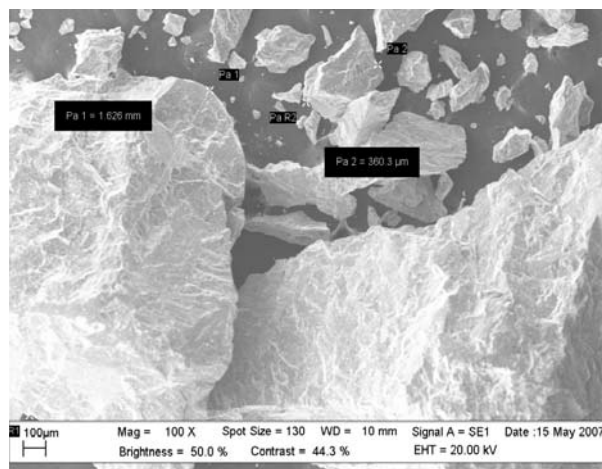


Рис. 3. Дробленный сплав TiFe с указанием размеров крупных и средних частиц (× 100)

Таблица 3

Состав и свойства сплава TiFe, полученного разными методами

Образец	Фазовый состав	Номер цикла максимальной емкости	E_c , дм ³ /кг	E_d , дм ³ /кг
Эталонный, полученный индукционной плавкой	TiFe	4	179 *	180
Спекание в среде чистого водорода по оптимальному режиму (партия сплава № 1)	TiFe	1	196	196
Спекание в среде чистого водорода по оптимальному режиму (партия сплава № 2)	TiFe	1	198	197
Спекание в среде чистого водорода по оптимальному режиму (партия сплава № 3)	TiFe	1	196	197
Спеченный в среде водорода с отклонением от режима	TiFe, следы TiFe ₂ и ϵ -фазы	1	176	170
Спеченный в полупромышленных условиях	TiFe, TiFe ₂ и TiFeO _x	6	142	135
Полученный дуговой плавкой с расходуемым электродом, хранился два года на воздухе, затем прошел 1000 циклов «сорбции–десорбции» водорода	TiFe	5	198	197

*По данным Института газа Академии наук Украины.

железа и титана на поверхности по сравнению с их содержанием в объеме. В то же время, как это следует из данных, приведенных на рис. 4, содержание кислорода на поверхности (12,55 мас. %) значительно выше, чем его общая концентрация, полученная методом высокотемпературной экстракции (0,033 мас. %). Такое высокое содержание кислорода на поверхности сплава может быть связано с наличием там оксидной фазы ϵ -Fe-Ti-O, обнаруженной при рентгенофазовом исследовании.

Отмечено также присутствие небольшого содержания кремния (0,48 мас. %) на поверхности частиц сплава TiFe. Этот кремний мог попасть на поверхность частиц сплава TiFe при приготовлении образцов для микроструктурных и рентгенографических исследований в результате истирания в агатовой ступке более крупных частиц, полученных после дробления слитка (агат – это минерал, являющийся разновидностью кварца, имеющего формулу SiO₂).

Применение сплава TiFe в гидридной холодильной установке

Данная разработка относится к холодильной технике, точнее к абсорбционным холодильным

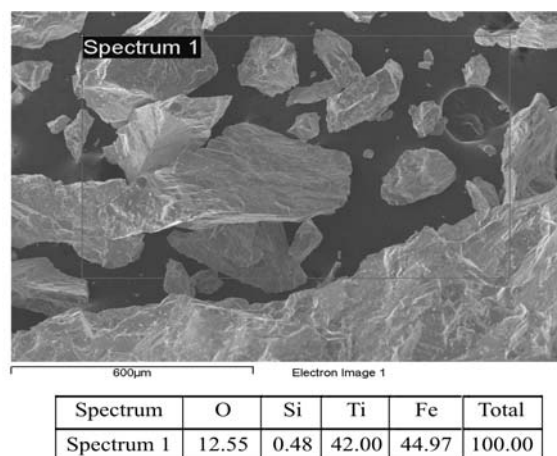


Рис. 4. Определение элементного состава дробленого сплава TiFe (мас. %) на поверхности частиц с помощью рентгеновского микроанализатора к РЭМ LEO-1420 ($\times 200$)

установкам периодического действия [9]. Работа над применением сплава TiFe, полученного дуговой плавкой с расходуемым электродом, проводилась совместно с Институтом проблем машиностроения АН УССР и Харьковским политехническим институтом.

Поскольку в качестве основных рабочих веществ предлагаемая установка содержит гидриды интерметаллидов, то она названа гидридной холодильной установкой (ГХУ).

Установка содержит (рис. 5) генератор-абсорбер водорода 1 с теплообменной поверхностью 2 внутри (компрессионный блок), генератор-абсорбер водорода 3 также со своей теплообменной поверхностью 4 внутри (холодопроизводящий блок), холодильную камеру 5 с охлаждающей поверхностью 6 внутри, запорные вентили 7 и 8, вентилятор 9, нагреватель 10, размещенный в генераторе-абсорбере водорода 1, линию 11 для хладагента (водорода) и линию 12 для хладоносителя (воздуха).

Генератор-абсорбер водорода 1 заполнен водородаккумулирующим сплавом с низким давлением гидридообразования, например LaNi_4Al или ZrNi (компрессионный сплав). Генератор-абсорбер 3 заполнен гидридом с высоким давлением диссоциации, например TiFeH_x или LaNi_5H_x (холодопроизводящий металлгидрид).

Работа установки осуществляется следующим образом. При включении вентилятора по линии 12 через теплообменную поверхность 4 генератора-абсорбера водорода 3 вентилятором подается хладоноситель, например воздух, который охлаждается за счет отбора теплоты в процессе десорбции водорода из металлгидрида TiFeH_x . Водород, десорбируемый

из гидрида в генераторе-абсорбере водорода 3, по линии 11 подается в газовую полость генератора-абсорбера водорода 1, где поглощается компрессионным сплавом с выделением теплоты, которая отводится теплообменной поверхностью 2. При этом, по мере поглощения водорода компрессионный сплав постепенно превращается в компрессионный металлгидрид, например $\text{LaNi}_4\text{AlH}_x$ или ZrNiH_x , а холодопроизводящий металлгидрид TiFeH_x по мере десорбции из него водорода – в холодопроизводящий сплав TiFe. Хладоноситель с низкой температурой через вентиль 7 подается на охлаждающую поверхность 6 холодильной камеры 5 и охлаждает последнюю. В этом случае вентиль 8 закрыт. После холодильной камеры теплый хладоноситель выбрасывается с охлаждающей поверхности 6 в атмосферу. После окончания процессов десорбции водорода в генераторе-абсорбере водорода 3 и сорбции водорода в генераторе-абсорбере водорода 1 включается нагреватель 10, и водород из генератора-абсорбера водорода 1 по линии 11 подается в генератор-абсорбер водорода 3, через теплообменную поверхность 4 которой проходит хладоноситель для снятия теплоты, выделяющейся при поглощении водорода холодопроизводящим сплавом TiFe, с последующим выводом хладоносителя через вентиль 8 в атмосферу. Вентиль 7 в это время закрыт. После перехода водорода из генератора-абсорбера водорода 1 в генератор-абсорбер водорода 3 цикл повторяется.

Эффективность данной установки основана на способности некоторых водородаккумулирующих материалов при относительно невысоких температурах (до 200–250 °С) с помощью прямого преобразования теплоты осуществлять термохимическое сжатие водорода. Это явление лежит в основе создания гидридных термосорбционных компрессоров водорода (ТСК), характеризующихся отсутствием движущихся частей и бесшумностью в работе. Такие устройства дают возможность получения высоких давлений водорода (20 МПа и выше), а также холода за счет низкопотенциальной энергии. В современной технологии для этого используют электроэнергию или пар высоких температур и давлений, т. е. высококачественную дорогостоящую энергию.

Низкопотенциальная энергия может быть бросовой в виде тепловых отходов различных

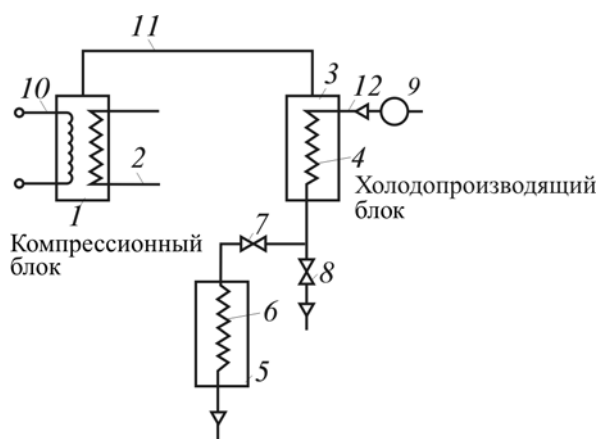


Рис. 5. Общая схема гидридной холодильной установки

технологических процессов [10], а также солнечным излучением. По существу, с помощью ТСК концентрируется низкопотенциальная энергия, так как сжатие водорода повышает энергетическую ценность системы.

Компрессионный металлгидрид в ГХУ должен генерировать водород с достаточным давлением для того, чтобы прогидрировать холодопроизводящий сплав, превратив его в холодопроизводящий металлгидрид. Именно на этом этапе работы происходят затраты энергии, которую ГХУ получает извне для нагрева компрессионного металлгидрида, и в данном случае для этого можно использовать низкопотенциальную энергию. Это главное положительное свойство ГХУ.

Проведена расчетная проработка энерготехнологических и конструктивных показателей стационарной ГХУ с холодильной мощностью примерно 100 кВт в сопоставлении с показателями традиционных парокомпрессионной и абсорбционной холодильных установок (АХУ). Проработка показала, что эксергический КПД для ГХУ равен 0,75, для АХУ – 0,4 и для парокомпрессионной установки – 0,2 [10].

Ориентировочная стоимость оборудования ГХУ близка к стоимости парокомпрессионной установки и примерно в 4 раза ниже стоимости АХУ [10].

Заключение

Разработана опытно-промышленная технология получения водородаккумулирующего сплава TiFe методом дуговой плавки с расходуемым электродом. Показана возможность использования вместо чистого железа более дешевой стали марки СтЗсп. Экспериментально установлено, что сплав TiFe, полученный по указанной технологии и прошедший ресурсные испытания, имеет самую высокую сорбционную емкость по водороду по сравнению со сплавами этого же состава, полученными методами порошковой металлургии и индукционной плавки.

Сплав TiFe из опытно-промышленной партии, полученный методом дуговой плавки с расходуемым электродом, был использован при разработке гидридной холодильной установки в Институте проблем машиностроения АН УССР. Основным достоинством ГХУ является то, что благодаря применяемым в ней ме-

таллогидридам можно получать холодильный эффект, используя для этого низкопотенциальную теплоту в виде тепловых отходов различных производств и в виде солнечной радиации.

Данный тип холодильных установок ГХУ может найти применение на предприятиях металлургии, машиностроения, химического производства, а также в пищевой отрасли промышленности.

Список литературы

1. Висволл Р. Хранение водорода в металлах // Водород в металлах. В 2 т. / под ред. Г. Алефельда и И. Фелькля. Т. 2: Прикладные аспекты: пер. с англ. – М.: Мир, 1981. С. 241–289.
2. Семенов К.Н., Бурнашева В.В. Синтез и фазовые превращения соединений водорода с металлами // Вест. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия, 1977. Т. 18. № 5. С. 618–632.
3. Тарасов Б.П. Металлогидридный способ аккумуляирования водорода // Сб. науч. докл. IV Международного совещания по проблемам энергоаккумуляирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. – М.: ИМАШ РАН, 2004. С. 457–458.
4. Сплавы-накопители водорода: справ. изд. / Б.А. Колачев, Р.Е. Шалин, А.А. Ильин. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
5. Mizuno T., Morozumi T. Titanium concentration in FeTi_x ($1 \leq x \leq 2$) alloys and its effect on hydrogen storage properties // J. Less-Common Metals. 1982. Vol. 84. P. 237–244.
6. Антонова М.М., Морозова Р.А. Препаративная химия гидридов: справочник. – Киев: Наукова думка, 1976. – 99 с.
7. Антонова М.М. Методика определения сорбционной емкости интерметаллида TiFe по отношению к водороду // Химическая технология. 1990. № 3. С. 39–43.
8. Эллиот Р.П. Структуры двойных сплавов. В 2 т. / под ред. И.И. Новикова и И.Л. Рогельберга. Т. 1 / пер. с англ. – М.: Металлургия, 1970. – 456 с.
9. Абсорбционная холодильная установка периодического действия / В.В. Соловей, В.А. Попович, Б.А. Левченко, А.А. Макаров, В.М. Кошельник, В.П. Мордовин // А.с. 1019188 А СССР, F 25 В 17/08. Заяв. в Гос. реестре изобр. СССР 22.01.1983.

10. Использование низкопотенциальных тепловых отходов технологических процессов с помощью гидридных термосорбционных компрессоров водорода на базе интерметаллидов семейства ЦЛАН / Ю.К. Байчток, В.З. Мордкович, Н.В. Дудакова, А.В. Ка-

симцев, В.П. Мордовин // Сб. науч. докл. III Международного совещания по проблемам энергоаккумулирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. – М.: ИМАШ РАН, 2002. С. 303–313.

Материал поступил в редакцию 05.12.2010

**Мордовин
Владимир Павлович**

E-mail: mvp1@mail.msiu.ru
Тел. +7 (495) 620-39-68

Доктор технических наук, старший научный сотрудник НИО МГИУ. Область научных интересов – материаловедение водородаккумулирующих материалов. Автор и соавтор более 110 научных работ, в том числе 17 авторских свидетельств и патентов.

**Куцев
Сергей
Владимирович**

E-mail: kutsev@yandex.ru
Тел. +7 (495) 718-16-55

Кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. Область научных интересов – неорганическая химия водородосодержащих материалов. Автор и соавтор более 60 научных работ.

Уважаемые читатели!

***Журнал «Машиностроение и инженерное образование»
входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов
и изданий, в которых должны быть опубликованы основные
научные результаты диссертаций на соискание ученых
степеней доктора или кандидата наук.***

Аннотации статей на русском и английском языках размещены на интернет-странице журнала: www.mio.msiu.ru