

УДК 621.762.242

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-4-15-24

Структура и свойства порошка гидрида титана, полученного из титановой губки методом СВС-гидрирования

© 2022 г. Н.П. Черезов, М.И. Алымов

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН (ИСМАН),
г. Черноголовка, Россия

Статья поступила в редакцию 14.03.2022 г., доработана 07.06.2022 г., подписана в печать 10.06.2022 г.

Аннотация: Представлены результаты исследования структуры и свойств порошков гидрида титана, полученных из титановой губки СВС-гидрированием и механическим измельчением. Гидрирование осуществляли в реакторе при постоянном давлении водорода 3 МПа. После прохождения волны горения горячую титановую губку охлаждали до комнатной температуры в среде водорода. В результате были получены губчатые гранулы гидрида титана с содержанием водорода 4,2 мас.%. Их измельчали в шаровой мельнице и разделяли на 4 фракции, соответствующие фракционному составу порошка титана: ПТК, ПТС, ПТМ и ПТОМ. Анализ размера частиц показал, что образцы порошков ПТК и ПТОМ имеют более узкое распределение частиц в сравнении с ПТС и ПТМ. Далее для полученных порошков были проведены исследования химического состава, морфологии поверхности и определены насыпная плотность, уплотняемость, пикнометрическая плотность и удельная поверхность. Из результатов химического анализа было установлено, что в ходе СВС-гидрирования происходит снижение содержания примеси углерода и кислорода, а при механическом измельчении, в зависимости от его времени, незначительно увеличивается содержание железа. Исследование морфологии показало, что частицы гидрида титана имеют неправильную осколочную форму, – такая морфология характерна для порошков, полученных по данной технологии. Структура поверхности частично сохранила структуру исходной титановой губки и состоит из вытянутых ориентированных зерен. Установлено, что с уменьшением размера частиц насыпная плотность снижается, а уплотняемость возрастает. Значения пикнометрической плотности и удельной поверхности приблизительно равны для всех образцов порошка.

Ключевые слова: гидрид титана, порошковая металлургия, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), гидрирование, морфология, технологические свойства.

Черезов Н.П. – мл. науч. сотр. лаборатории высокоэнергетических методов синтеза сверхвысокотемпературных керамических материалов ИСМАН (142432, Московская обл., Ногинский р-н, г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, 8). E-mail: cherezovnikita@gmail.com.

Алымов М.И. – докт. техн. наук, проф., чл.-кор. РАН, директор ИСМАН. E-mail: alymov.mi@gmail.com.

Для цитирования: Черезов Н.П., Алымов М.И. Структура и свойства порошка гидрида титана, полученного из титановой губки методом СВС-гидрирования. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2022. Т. 16. № 4. С. 15–24. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-4-15-24.

Structure and properties of titanium hydride powder obtained from titanium sponge by SHS hydrogenation

N.P. Cherezov, M.I. Alymov

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (ISMAN),
Chernogolovka, Russia

Received 14.03.2022, revised 07.06.2022, accepted for publication 10.06.2022

Abstract: The results of the study of the structure and properties of titanium hydride powders obtained from titanium sponge by SHS hydrogenation and mechanical grinding are presented. Hydrogenation was carried out in a reactor at a constant hydrogen pressure of 3 MPa. After passing the combustion wave, the hot titanium sponge was cooled to room temperature in a hydrogen atmosphere. As a result, titanium hydride spongy granules with a hydrogen content of 4.2 wt.% were obtained. Titanium hydride was ground in a ball mill and divided into 4 fractions corresponding to the fractional composition of titanium powder PTK, PTS, PTM and PTOM. Particle size analysis showed that the samples of the PTK and PTOM powders have a narrower particle distribution

in comparison with the PTS and PTM ones. Further, obtained powders chemical composition and surface morphology studies were carried out and bulk density, compaction, pycnometric density and specific surface area were determined. According to the chemical analysis results the content of carbon and oxygen impurities decreases during SHS-hydrogenation and the iron content slightly increases during mechanical grinding depending on the grinding time. The study of morphology showed that the hydride titanium particles have an irregular fragmentary shape, such morphology is characteristic of powders obtained by this technology. The surface structure has partially preserved structure of the initial titanium sponge and consists of elongated oriented grains. It is established that with a decrease in the particle size, the bulk density decreases, and the compaction increases. Pycnometric density and specific surface area values are approximately equal for all powder samples.

Keywords: titanium hydride, powder metallurgy, self-propagating high-temperature synthesis (SHS), hydrogenation, morphology, technological properties.

Cherezov N.P. – junior researcher of the Laboratory of high-energy methods of synthesis of ultrahigh-temperature ceramic materials of Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (ISMAN) (142432, Russia, Moscow region, Noginsk district, Chernogolovka, Akademian Osip'yan str., 8).
E-mail: cherezovnikita@gmail.com.

Alymov M.I. – Dr. Sci. (Eng.), prof., corresponding member of the Russian Academy of Sciences, director of the ISMAN.
E-mail: alymov.mi@gmail.com.

For citation: Cherezov N.P., Alymov M.I. Structure and properties of titanium hydride powder obtained from titanium sponge by SHS hydrogenation. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2022. Vol. 16. No. 4. P. 15–24 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-4-15-24.

Введение

Титан является одним из металлов, способных активно поглощать водород и образовывать гидриды. Известно, что гидрид титана (TiH_2) представляет собой химическое соединение титана с водородом, где атомы водорода случайным образом распределены в пустотах тетраэдрической решетки титана [1, 2]. Гидрид титана имеет довольно широкое практическое применение в космической, авиационной, химической сфере и в ядерной энергетике. Гидрид титана используется для получения пористого титана, титановых фильтров и в качестве пенообразователя для производства пеноалюминия. В последнее время, благодаря высокой водородной емкости (4,04 мас.%), гидриды титана применяются в качестве материала для хранения водорода [3–9].

Известно, что водород вызывает охрупчивание металлов и сплавов. Хрупкость гидрида титана обусловлена тем, что водород снижает напряжение, необходимое для начала движения дислокаций, повышает скорость их перемещения, способствует зарождению микротрещин, их росту и лавинному распространению. Также при гидрировании титана происходит увеличение объема элементарной ячейки — приблизительно в 2,5 раза [10].

Это свойство используется для производства порошков титана из титановой губки или лома методом гидрирования-дегидрирования. В процессе гидрирования исходный титан насыщают водородом методом изотермического нагрева в атмосфе-

ре водорода. Полученный гидрид титана весьма хрупок и может быть измельчен до микроразмеров путем механического измельчения в течение короткого периода времени. Затем гидрид титана можно дегидрировать с получением мелкодисперсного порошка титана, который используется для создания коррозионно-стойких фильтров, медицинских имплантов и изготовления изделий методами порошковой металлургии [11–14]. Частицы порошков, полученные этим способом, имеют неправильную осколочную форму, а содержание примесей зависит от содержания примесей в исходном сырье. Получаемый порошок титана имеет тот же гранулометрический состав, что и исходный гидрид титана. Процесс является относительно недорогим, процессы гидрирования и дегидрирования незначительно повышают стоимость конечного порошка. Мелкодисперсный порошок гидрида титана также применяется для синтеза бинарных и многокомпонентных сплавов и интерметаллидов [15, 16].

Гидрид титана может быть получен в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Сущность метода заключается в использовании тепла экзотермической реакции, протекающей после локального инициирования реакции горения. Во фронте горения развиваются высокие температуры, фронт горения перемещается по исходному титану благодаря теплопередаче от слоя к слою. Процесс протекает без внешних

энергозатрат, лишь за счет тепла химической реакции $\text{Ti} + \text{H}_2 \rightarrow \text{TiH}_2 + Q$ (39 ккал/моль) [17].

Получение порошка титана методом СВС-гидрирования губки и последующего дегидрирования экономически выгодно. Применение таких порошков в качестве исходного компонента позволяет значительно снизить себестоимость титановой продукции [18].

Важное значение для изделий, изготавливаемых методами порошковой металлургии титана, имеют технологические свойства (насыпная плотность, прессуемость) исходных порошков [19, 20]. В соответствии с требованиями потребителя они должны обладать определенными характеристиками и особенностями. Поэтому изучение свойств и структуры частиц порошков, применяемых при изготовлении изделий путем твердофазного спекания, является актуальной задачей для развития технологий порошковой металлургии титана. Параметры качества порошков должны быть стабильными и не изменяться в течение времени хранения [21–23].

Цель данной работы — изучение структуры и определение технологических и химических свойств порошков гидрида титана, полученных СВС-гидрированием титановой губки в реакторе с последующим механическим измельчением.

Материалы и методы исследования

Порошки гидрида титана с фракционным составом, соответствующим гранулометрическому составу порошков марок ПТК, ПТС, ПТМ, ПТОМ (ТУ 14-22-57-92), были получены гидрированием титановой губки марки ТГ-100 (ГОСТ 17746-96). Размер частиц исходной титановой губки составлял от 5 до 20 мм. В качестве источника водорода использовали газообразный водород марки «А» (ГОСТ 3022-80).

Гидрирование губки проводили в герметичном реакторе объемом 2 л (рис 1, а). Титановую губку массой 0,5 кг загружали в газопроницаемый стакан, устанавливаемый в реакторе. Для поджига титановой губки применяли мелкодис-

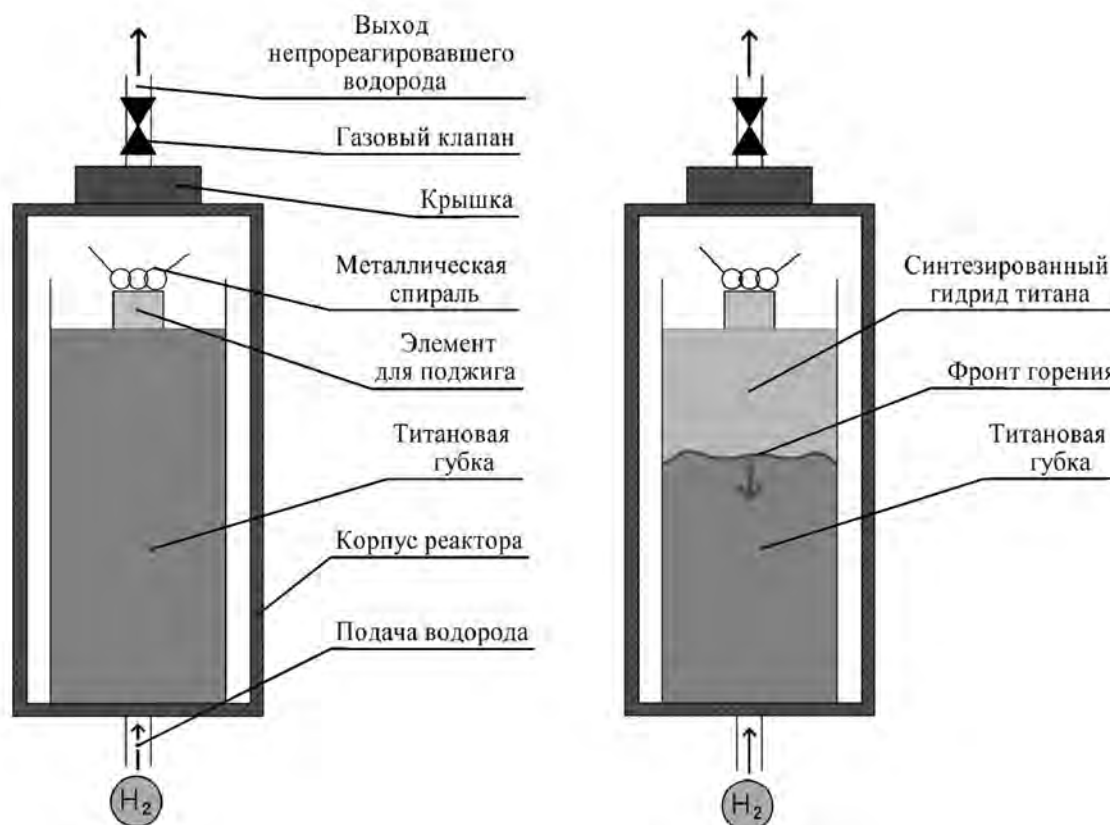


Рис. 1. Схематическое изображение реактора высокого давления (а) и процесса СВС-гидрирования (б)

Fig. 1. High-pressure reactor schematic illustration (а) and SHS hydrogenation process (б)

Таблица 1. Режимы измельчения гидрированной титановой губки

Table 1. Hydrogenated titanium sponge grinding modes

Режим измельчения	Масса измельчаемой губки, кг	Скорость вращения барабана, об/мин	Время измельчения, мин	Соотношение масс мелющих тел и титановой губки
1	0,5	90	15	5 : 1
2	0,5	90	20	5 : 1
3	0,5	90	25	5 : 1

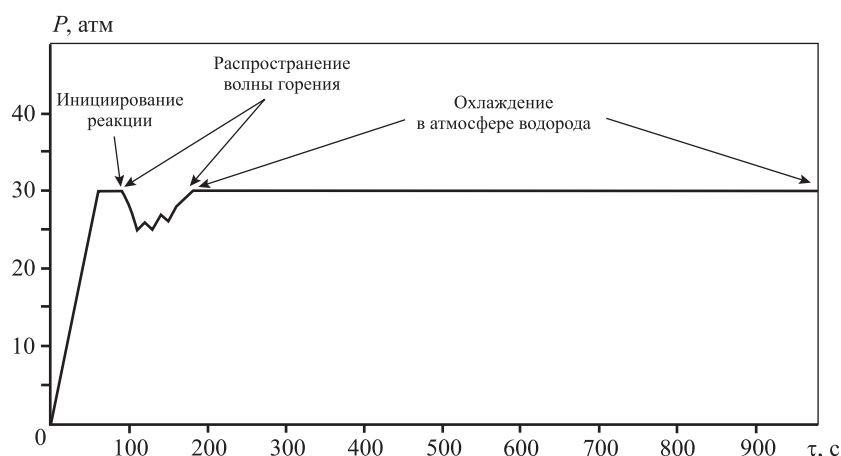


Рис. 2. Изменение давления водорода в реакторе в процессе СВС-гидрирования

Fig. 2. Hydrogen pressure variation in the reactor during SHS hydrogenation

персный порошок титана, размещенный в бумажном конверте сверху титановой губки. Инициирование реакции осуществляли за счет нагрева нихромовой спирали путем пропускания электрического тока. Перед синтезом реактор герметизировали и продували водородом для удаления воздуха. Далее его заполняли водородом до давления водорода 30 атм. В процессе горения давление поддерживали путем периодической подачи водорода во встречном направлении по отношению к распространению фронта горения (рис 1, б). Время синтеза составило порядка 75 с. Затем нагретая титановая губка охлаждалась в атмосфере водорода в течение 1 ч до комнатной температуры (рис. 2).

Полученную губку гидроксида титана механически измельчали в стальной барабанно-шаровой мельнице со стальными мелющими телами по режимам, представленным в табл. 1.

За счет варьирования времени измельчения были получены порошки гидроксида титана с распределением частиц, показанным на рис. 3.

Для дальнейших исследований измельченные

порошки подвергали ситовому просеиванию (по ГОСТ 18318-94) для получения порошков гидроксида титана с фракционным составом, соответствующим маркам порошков ПТК, ПТС, ПТМ и ПТОМ. В результате были получены порошки 4 фракций: ПТК (<40 мкм — 10 мас.%; 40—280 мкм — ост.), ПТС (40—100 мкм — 35 мас.%; <40 мкм — ост.), ПТМ (40—100 мкм — 25 мас.%; <40 мкм — ост.), ПТОМ (40—100 мкм — 5 мас.%; <40 мкм — ост.).

Для этих фракций определяли следующие технологические характеристики порошков: насыпная плотность, прессуемость, пикнометрическая плотность, удельная поверхность. Также для полученных порошков изучена морфология, проведено распределение частиц по размерам методом лазерной дифракции, установлено содержание основных примесей.

Насыпную плотность порошков определяли по ГОСТ 19440-94, их прессуемость (уплотняемость) — по ГОСТ 25280-90. Пикнометрическую плотность порошка устанавливали по ГОСТ 2211-2020: метод основан на определении массы аналитической пробы и ее истинного объема с по-

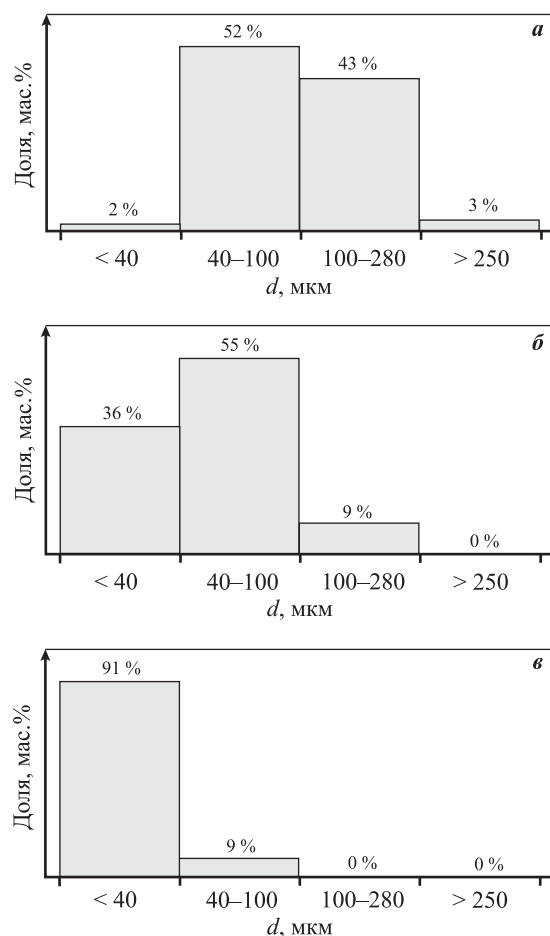


Рис. 3. Распределение частиц гидрида титана при режимах измельчения 1 (а), 2 (б), 3 (в)

Fig. 3. Particles titanium hydride distribution at grinding modes 1 (a), 2 (б), 3 (в)

следующим вычислением плотности. Истинный объем пробы оценивали с помощью пикнометра с использованием насыщающей жидкости (толуол). Удельную поверхность измеряли по методике низкотемпературной адсорбции азота на приборе для определения удельной поверхности пористых материалов «Sorbi-M».

Морфологию частиц полученного порошка гидрида титана изучали на растровом электронном микроскопе LEO 1450. Размер частиц исследовали на лазерном анализаторе частиц «MicroSizer 201». Содержание примесных элементов углерода, кислорода, азота и водорода определяли на анализаторе «Лесо» CS-600, АК-7716П, «Лесо» TC-600 и «Лесо» RHEN-602 соответственно. Для оценки содержания железа в порошке использовали фотометр КФК-3-01.

Результаты и их обсуждение

В результате СВС-гидрирования титановой губки был получен гидрид титана с содержанием водорода 4,2 мас.%. Предполагается, что повышенное содержание водорода связано с концентрационной диффузией, обусловленной высоким давлением водорода (30 атм) в реакторе при синтезе. Наличие большого количества растворенного водорода в кристаллической решетке титана вызывает хрупкость последнего, что позволяет измельчить крупную губку с размером частиц >20 мкм до частиц <40 мкм.

После измельчения порошки были разделены на 4 фракционных состава, которые соответствуют гранулометрическому составу марок ПТК, ПТС, ПТМ и ПТОМ. На рис. 4 представлены гистограммы распределения частиц исследуемых порошков гидрида титана. Порошки образцов ПТК и ПТОМ имеют более узкое распределение частиц в сравнении с ПТС и ПТМ.

Важную роль в качестве изделий, изготавливаемых из порошков титана, играют примеси. Присутствие небольшого количества металлических примесей, например железа или алюминия, не оказывает существенного влияния на свойства конечного продукта. Содержание неметаллических примесей, например кислорода, азота, углерода, должно быть строго ограничено, поскольку они образуют с титаном твердые растворы внедрения и химические соединения, существенно снижающие пластичность титана. В связи с этим был проведен химический анализ исходного материала и синтезируемого порошка (табл. 2). В результате установлено, что в процессе СВС-гидрирования уменьшилось содержание углерода и кислорода, что свидетельствует о самоочистке титановой губки. Предположительно, снижение примесей происходит в процессе горения, когда идет резкое разогревание исходной титановой губки. Это приводит к значительному увеличению коэффициента диффузии и способствует диффузионному массопереносу атомов примесей к поверхности частиц. Уже на поверхности атомы примесей азота и углерода могут образовывать молекулы, которые впоследствии десорбируются в газовую фазу [24]. Содержание железа из-за намола от мелющих тел при механическом измельчении ввиду малого времени измельчения повышается незначительно.

Форма частиц порошка титана в большей мере определяет его поведение на всех этапах техноло-

Таблица 2. Содержание примесей, мас.%, в синтезированном порошке гидрида титана

Table 2. Impurity content, wt.%, in the synthesized titanium hydride powder

Образец	C	N	O	Fe
Исходная титановая губка ТГ-100	$0,52 \pm 0,03$	$0,11 \pm 0,01$	$0,51 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,001$
ПТК	$0,18 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,01$	$0,26 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,001$
ПТС	$0,11 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,01$	$0,21 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,001$
ПТМ	$0,13 \pm 0,01$	$0,28 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,001$
ПТОМ	$0,17 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,02$	$0,25 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,001$

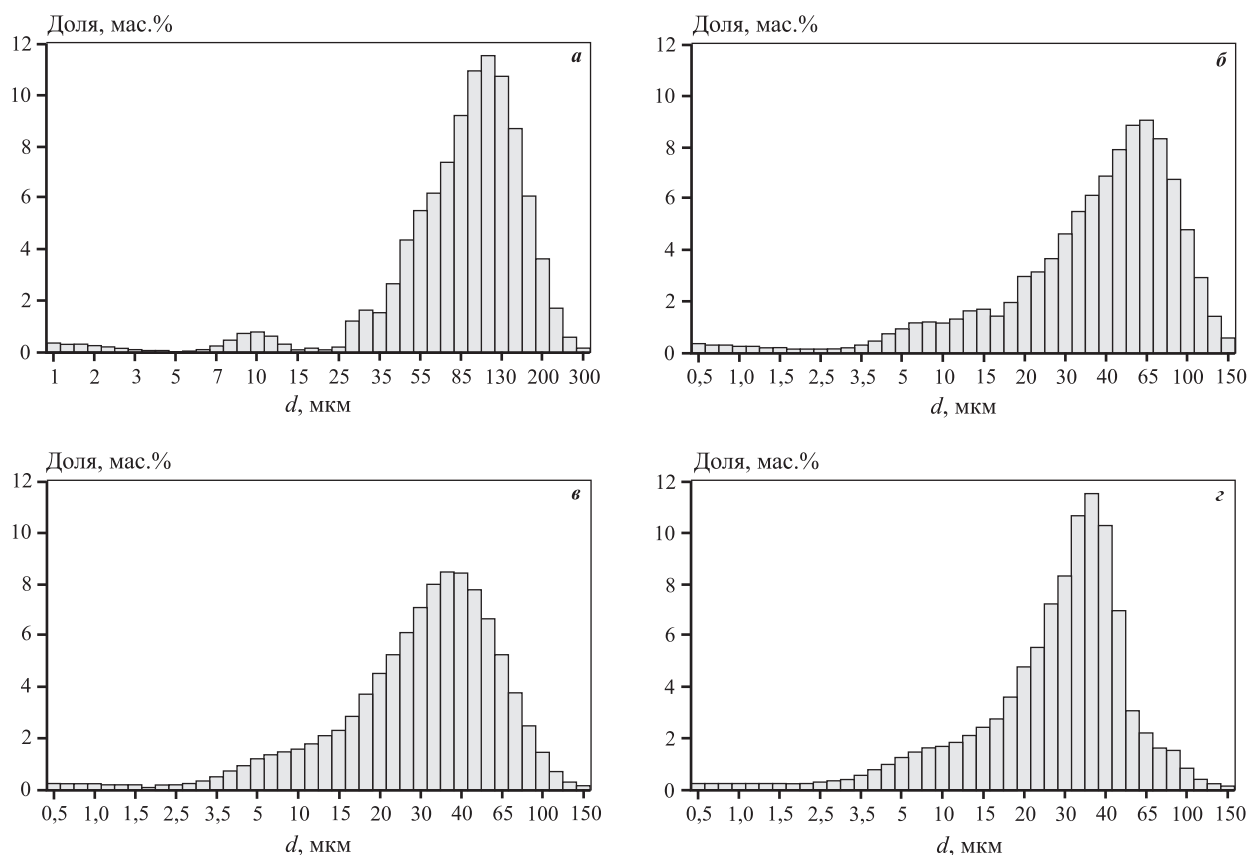


Рис. 4. Гистограммы распределения частиц синтезированного порошка гидрида титана по размерам
Изучены образцы ПТК (а), ПТС (б), ПТМ (в), ПТОМ (г)

Fig. 4. Histograms of the synthesized titanium hydride powder particle distribution by size
PTK (a), PTS (б), PTM (в), PTOM (г)

гического процесса получения изделий. Она также существенно влияет на технологические свойства. На рис. 5 (СЭМ-изображения) представлен общий вид полученных порошков гидрида титана. На фотографиях хорошо видно, что частицы гидрида имеют неправильную осколочную форму. Данная морфология характерна для порошков, получаемых по данной технологии [14].

Микроструктура поверхности гидрида титана (рис. 6) частично сохраняет пластинчатую структуру титановой губки. Как видно (рис. 6, а, в), структура поверхности похожа на структуру после отжига и состоит из крупных вытянутых ориентированных зерен. В поверхностных слоях гидрида титана (рис. 6, б) просматриваются следы растрескивания из-за напряжений, возникающих

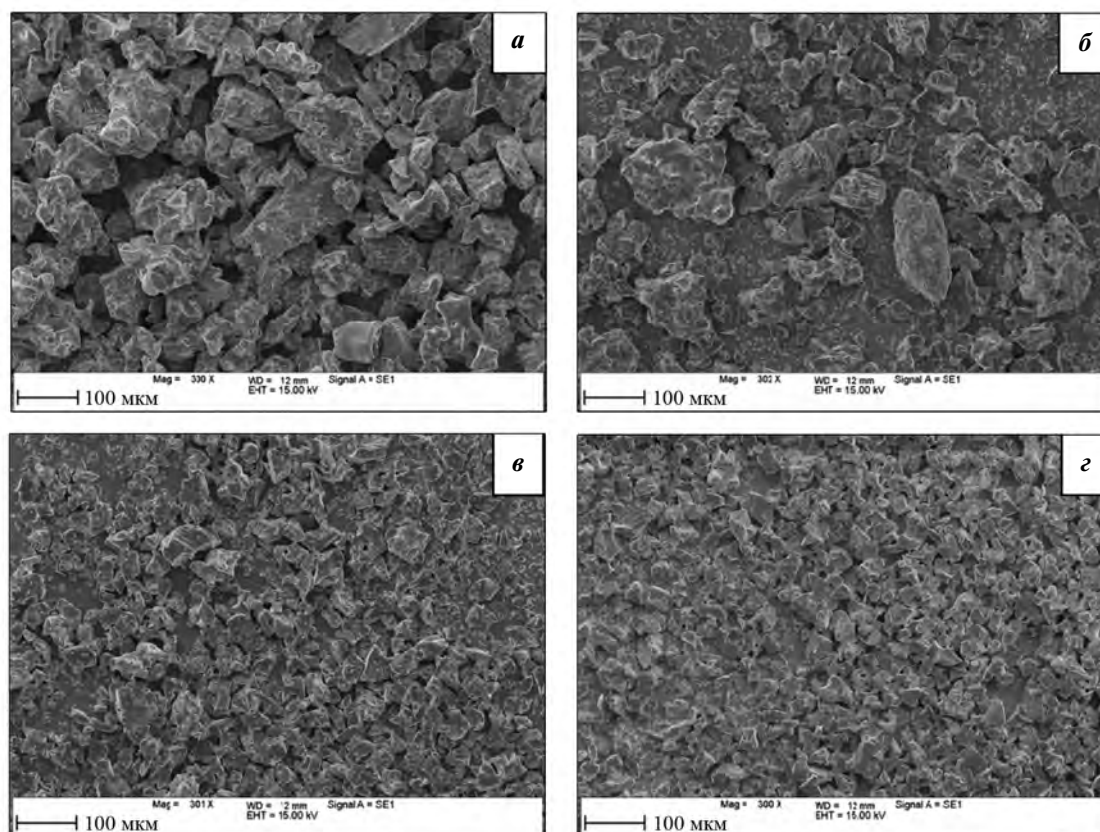


Рис. 5. Общий внешний вид синтезированного порошка гидрида титана

a – ПТК, *б* – ПТС, *в* – ПТМ, *г* – ПТОМ

Fig. 5. Synthesized titanium hydride powder general appearance

a – PTK, *б* – PTS, *в* – PTM, *г* – PTOM

вследствие различных удельных объемов титана и гидрида титана. На рис. 6, *г* представлена поверхность межзеренного хрупкого излома, для внешнего вида которого характерно наличие относительно гладких поверхностей.

Порошки одного и того же химического состава, но с разными физическими характеристиками могут обладать различными технологическими свойствами, что влияет на условия дальнейшего превращения порошков в готовые изделия.

Технологические свойства синтезированного порошка гидрида титана представлены в табл. 3.

Насыпная плотность — объемная характеристика порошка, которая представляет собой отношение массы порошка к его объему при свободной насыпке. Ее величина зависит от плотности упаковки частиц порошка при свободном заполнении определенного объема. Плотность упаковки тем больше, чем крупнее и более правильной формы частицы порошка и чем больше их пикнометри-

ческая плотность. Значение насыпной плотности полученных порошков гидрида титана снижается с уменьшением размера частиц. Образец ПТК имеет более широкий фракционный состав, что приводит к более плотной упаковке частиц: мелкие частицы заполняют пустоты, образующиеся при упаковке более крупных. Образец ПТОМ обладает большей удельной поверхностью из-за уменьшения размера частиц, что повышает трение между частицами, затрудняя их перемещение относительно друг друга, приводя к снижению насыпной плотности.

Уплотняемость порошка — это способность порошка под влиянием внешнего усилия приобретать и удерживать определенную форму и размеры. Хорошая прессуемость облегчает и удешевляет процесс формования порошка. Измеренные значения уплотняемости полученных порошков почти одинаковы — это связано с тем, что частицы гидрида титана обладают высокой хрупкостью

Таблица 3. Технологические свойства синтезированного порошка гидрида титана

Table 3. Titanium hydride synthesized powder technological properties

Образец	Насыпная плотность, г/см ³	Уплотняемость, г/см ³ , при давлении 200 МПа	Пикнометрическая плотность, г/см ³	Удельная поверхность, м ² /г
ПТК	1,38 ± 0,04	2,83 ± 0,04	3,79 ± 0,01	0,6 ± 0,01
ПТС	1,31 ± 0,03	2,85 ± 0,03	3,81 ± 0,01	0,6 ± 0,01
ПТМ	1,30 ± 0,02	2,86 ± 0,03	3,80 ± 0,01	0,6 ± 0,01
ПТОМ	1,16 ± 0,02	2,88 ± 0,03	3,72 ± 0,01	0,7 ± 0,01

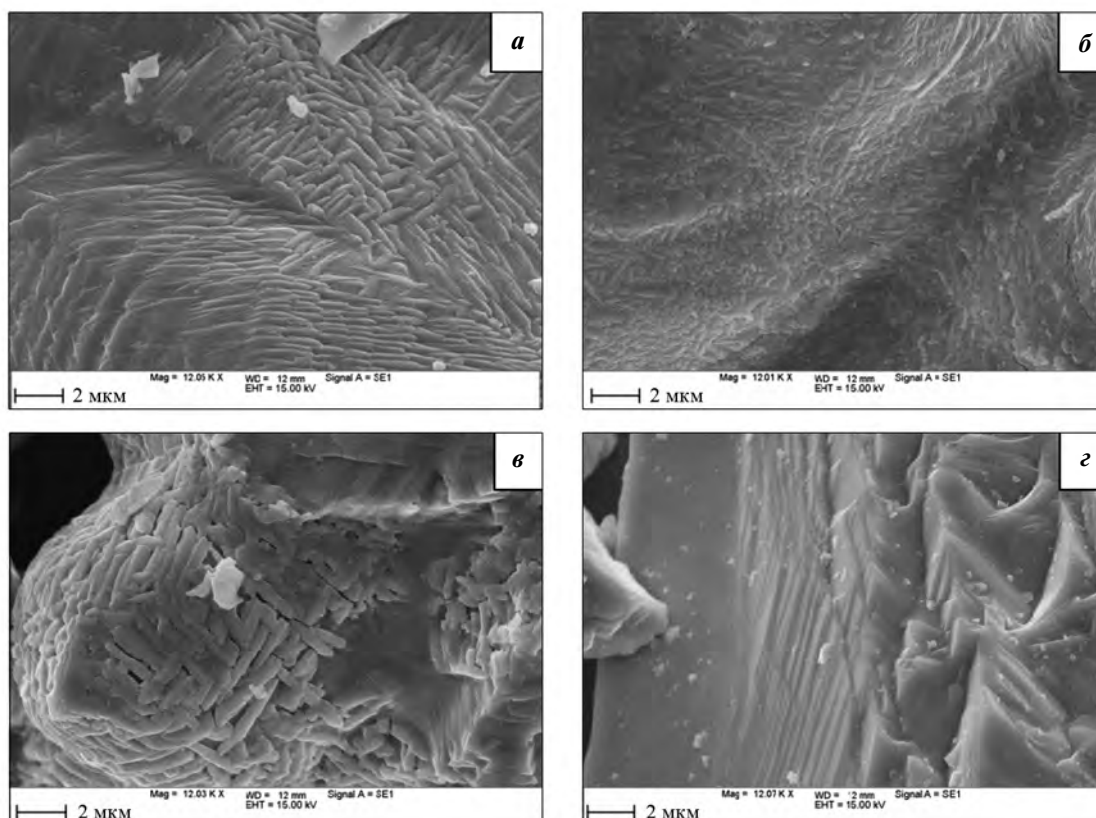


Рис. 6. Микроструктура синтезированного порошка гидрида титана

а – ПТК, б – ПТС, в – ПТМ, г – ПТОМ

Fig. 6. Synthesized titanium hydride powder micro structure

а – РТК, б – РТС, в – РТМ, г – РТОМ

и во время прессования разрушаются, заполняя пустоты.

В силу особенностей процесса изготовления частицы металлических порошков могут характеризоваться значительной внутренней пористостью и наличием большого количества вакантных мест в узлах кристаллической решетки. В результате этого фактическая плотность частиц может значительно отличаться от плотности, вычисля-

емой из данных рентгенографического определения параметров решетки. Плотность полученных частиц гидрида титана коррелирует с теоретической плотностью 3,75 г/см³, что свидетельствует о практически полном отсутствии пор в материале частиц.

За удельную поверхность дисперсных тел принимают площадь поверхности единицы массы или объема порошка. Удельная поверхность зависит не

только от размера частиц, но и от степени развитости их поверхности, которая определяется условиями получения порошков. Удельная поверхность является весьма важной характеристикой порошков: от нее зависят содержание адсорбированных газов в порошках, их коррозионная стойкость, спекаемость и ряд других характеристик. Значения удельной поверхности полученного порошка гидрида титана близки к таковым у сферических порошков ($0,14 \text{ м}^2/\text{г}$), следовательно, полученный порошок гидрида не обладает развитой пористой поверхностью, что согласуется с полученными данными о морфологии частиц.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования структуры и свойств порошков гидрида титана, полученных из титановой губки методом СВС в реакторе высокого давления.

Установлено, что гидрированная титановая губка быстро и легко измельчается до размеров частиц менее 40 мкм благодаря высокой хрупкости гидрида титана. Содержание примеси железа во время механического измельчения увеличивается незначительно. В процессе СВС-гидрирования происходит самоочистка конечного продукта, снижается содержание примесей углерода и кислорода.

Частицы гидрида титана имеют неправильную осколочную форму. В целом, форма и дефекты частиц являются характерными для порошков, полученных данным методом. Структура поверхности частиц состоит из вытянутых ориентированных зерен. В поверхностных слоях гидрида титана просматриваются следы растрескивания из-за напряжений, возникающих вследствие различных удельных объемов титана и гидрида титана.

Исследования технологических свойств показали, что полученные порошки обладают необходимыми параметрами для применения в порошковой металлургии.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСМАН.

Acknowledgments: *The work was performed within the state assignment of ISMAN.*

Литература/References

1. Xu J.J., Cheung H.Y., Shi S.Q. Mechanical properties of titanium hydride. *J. Alloys Compd.* 2007. Vol. 436. Iss. 1—2. P. 82—85. DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.06.107.
2. Левинский Ю.В., Патрикеев Ю.Б., Филянд Ю.М. Водород в металлах и интерметаллидах. М.: Научный мир, 2017.
Levinskii Yu.V., Patrikeev Yu.B., Filyand Yu.M. Hydrogen in metals and intermetallics. Moscow: Nauchnyi mir, 2017 (In Russ.).
3. Ma M., Liang L., Wang L., Wang Y., Cheng Y., Tang B., Xiang W., Tan X. Phase transformations of titanium hydride in thermal desorption process with different heating rates. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2015. Vol. 40. Iss. 29. P. 8926—8934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.05.083.
4. Sakintuna B., Lamari-Darkrim F., Hirscher M. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2007. Vol. 32. Iss. 9. P. 1121—1140. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2006.11.022.
5. Liu H., He P., Feng J.C., Cao J. Kinetic study on nonisothermal dehydrogenation of TiH_2 powders. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2009. Vol. 34. Iss. 7. P. 3018—3025. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.01.095.
6. Erk K.A., Dunand D.C., Shull K.R. Titanium with controllable pore fractions by thermoreversible gelcasting of TiH_2 . *Acta Mater.* 2008. Vol. 56. Iss. 18. P. 5147—5157. DOI: 10.1016/j.actamat.2008.06.035.
7. Lehmhus D., Rausch G. Tailoring titanium hydride decomposition kinetics by annealing in various atmospheres. *Adv. Eng. Mater.* 2004. Vol. 6. Iss. 5. P. 1438—1656. DOI: 10.1002/adem.200300572.
8. Yang C.C., Nakae H. Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam. *J. Alloys Compd.* 2000. Vol. 313. Iss. 1—2. P. 188—191. DOI: 10.1016/S0925-8388(00)01136-1.
9. Kennedy A.R., Lopez V.H. The decomposition behavior of as-received and oxidized TiH_2 foaming-agent powder. *Mater. Sci. Eng. A.* 2003. Vol. 357. Iss. 1—2. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00211-9.
10. Жарков А.Ю., Рудских В.В., Левченкова О.Н., Волкова Т.С., Светлаков С.В. Исследование процесса гидрирования дробы титана при пониженном давлении водорода. В сб. 2-й отрасл. конф.: *Титан в атомной промышленности*. Глазов: ОАО ЧМЗ, 2014.
Zharkov A.Yu., Rudskikh V.V., Levchenkova O.N., Volkova T.S., Svetlakov S.V. Investigation of the process of titanium shot hydrogenation at reduced hydrogen pressure. In: *Titanium in the nuclear industry: 2-nd Industry Conf.* Glazov: OAO ChMZ, 2014 (In Russ.).
11. Bhosle V., Baburaj E.G., Miranova M., Salama K. Dehydrogenation of TiH_2 . *Mater. Sci. Eng. A.* 2003. Vol. 356. Iss. 1—2. P. 190—199. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00117-5.
12. Zheng Y., Zhang J., Liu Y., Jia S., Tang R., Zhang D. Dehydrogenation and spheroidization of titanium hydride powder based on fluidization principle. *Heat*

- Treat. Surf. Eng.* 2020. Vol. 2. No. 1. P. 22–29. DOI: 10.1080/25787616.2020.1845443.
13. Yanko T., Brener V., Ovchinnikov O. Production of spherical titanium alloy powders used in additive manufacturing from titanium scrap. In: *MATEC Web Conf*: 14th World Conf. on Titanium (Ti-2019). 2020. Vol. 321. DOI: 10.1051/mateconf/202032107008.
14. Goso X., Kale A. Production of titanium metal powder by the HDH process. In: *Advanced Metals Initiative: Light Metals Conf.* 2010. Vol. 111. No. 3. P. 203–210.
15. Huiping S., Zhi W., Tao L., Zhimeng G., Qing Y., Jun W., Sen S., Shaoyuan L. Method for preparing TiAl inter-metallic compound powder by using titanium hydride powder: Pat. 102825259A (China). 2012.
16. Ivasishin O., Moxson V. Low-cost titanium hydride powder metallurgy. *Titanium Powder Metallurgy*. 2015. P. 117–148. DOI: 10.1016/B978-0-12-800054-0.00008-3.
17. Долуханян С.К. СВС-метод получения аккумуляторов водорода. *Альтерн. энергетика и экология*. 2005. No. 11. С. 13–16.
Dolukhanyan S.K. SHS method for obtaining hydrogen batteries. *Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2005. No. 11. P. 13–16 (In Russ.).
18. Ратников В.И., Прокудина В.К., Беликова А.Ф., Сачкова Н.В. Получение порошка титана из титановой губки СВС-гидрированием и дегидрированием. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2009. No. 4. С. 25–30.
Ratnikov V.I., Prokudina V.K., Belikova A.F., Sachkova N.V. Obtaining titanium powder from a titanium sponge by SHS hydrogenation and dehydrogenation. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsionalnyye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2009. No. 4. P. 25–30 (In Russ.).
19. Chen W., Yamamoto Y., Peter W.H., Gorti S.B., Sabau A.S., Clark M.B., Nunn S.D., Kiggans J.O., Blue C.A., Williams J.C., Fuller B., Akhtar K. Cold compaction study of Armstrong Process Ti–6Al–4V powders. 2011. *Powder Technol.* Vol. 214. Iss. 2. P. 194–199. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.08.007.
20. Machaka R., Chikwanda H.K. Analysis of the cold compaction behavior of titanium powders: A comprehensive Inter-model comparison study of compaction equations. *Metall. Mater. Trans. A*. 2015. Vol. 46. P. 4286–4297. DOI: 10.1007/s11661-015-3038-6.
21. Павленко Д.В. Влияние параметров порошков титана на прочность спеченных полуфабрикатов. *Нові матеріали і технології в металургії і машинобудуванні*. 2014. No. 2. С. 87–92.
Pavlenko D.V. Influence of parameters of titanium powders on the strength of sintered semi-finished products. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii i mashinostroenii*. 2014. No. 2. P. 87–92 (In Ukr.).
22. Князев А.Е., Неруш С.В., Алишин М.И., Куко И.С. Исследования технологических свойств металлопорошковых композиций титановых сплавов ВТ6 и ВТ20, полученных методом индукционной плавки и газовой атомизации. *Тр. ВИАМ*. 2017. Vol. 59. No. 11. С. 44–53. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-6-6.
Knyazev A.E., Nerush S.V., Alishin M.I., Kuko I.S. Studies of technological properties of metal-powder compositions of titanium alloys VT-6 and VT-20 obtained by induction melting and gas atomization. *Trudy VIAM*. 2017. Vol. 59. No. 11. P. 44–53. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-6-6 (In Russ.).
23. Chen B., Shen J., Ye X., Umeda J., Kondoh K. Advanced mechanical properties of powder metallurgy commercially pure titanium with a high oxygen concentration. *J. Mater. Res.* 2017. Vol. 32. P. 3769–3776. DOI: 10.1557/jmr.2017.338.
24. Потехин А.А., Горькаев Д.А., Постников А.Ю., Тарасова А.И., Малышев А.Я. Изучение самоочистки реакционной системы в процессе СВС. *Тр. РФЯЦ–ВНИИЭФ*. 2015. Т. 20. Ч. 2. С. 618–619.
Potekhin A.A., Gorkaev D.A., Postnikov A.Y., Tarasova A.I., Malyshev A.Y. Self-purification from impurities during SHS of titanium hydride. *Int. J. SHS*. 2014. Vol. 23. No. 1. P. 58–61.