

Удержание водорода сплавами ванадий-титан

Аунг Чжо Зо, И. И. Чернов, М. С. Стальцов, Б. А. Калинин, В. С. Ефимов

Изучено удержание водорода в ванадии и его двойных сплавах с титаном методом термодесорбционной спектрометрии водорода. Образцы насыщены водородом в течение 2000 ч в автоклаве с температурой воды 620 К, в который подавали водород под давлением 16,8 МПа. Показано, что в сплавах V – Ti существует два основных типа ловушек, выделение из которых водорода происходит в интервалах температур 780 – 790 (пик I) и 870 – 880 К (пик II). При этом положение на температурной шкале пика I не зависит от состава сплава, а интенсивность и положение пика II на температурной шкале определяются составом сплава. Титан немонотонно влияет на количество удерживаемого водорода: по сравнению с захватом водорода ванадием: добавка 0,5 % Ti уменьшает, добавки 1 и 5 % Ti увеличивают, а 10 % Ti снова снижает количество водорода в сплаве. Предложено физическое объяснение появления двух пиков термодесорбции водорода и немонотонного влияния содержания титана в ванадии на количество удерживаемого водорода.

Ключевые слова: ванадий, ванадиевые сплавы, водород, удержание водорода, термодесорбция водорода.

Введение

Ванадиевые сплавы с быстрым спадом наведенной активности системы V – Ti – Cr считают перспективными конструкционными материалами будущих термоядерных реакторов (ТЯР) типа ДЕМО [1 – 3]. Есть интересная концепция использования ванадиевых сплавов в качестве оболочки твэла реактора на быстрых нейтронах (РБН) с натриевым охлаждением, где жаропрочность обеспечивает ванадиевый сплав, а коррозионную стойкость — плакирующие слои из ферритной стали [4]. Возможно охрупчивание сплавов ванадия при контакте с изотопами водорода в условиях эксплуатации [5 – 9]. Так, в работе [7] показано, что снижение относительного удлинения сплавов системы V – Ti – Cr в атмосфере водорода ($P \approx 0,13$ кПа) начинается при концентрации 360 wppm H₂. В ТЯР и РБН имеется ряд источников поступления водорода в конструкционный материал: основной — трансмутационные реакции типа (n, p), (n, d), (n, t) и (n, n^1p), имеющие пороговый (энергетический) характер. При этом наработка водорода в ванадии в ТЯР существенно превышает его накопление в РБН. Например, по расчетам за 560 суток облучения в БН-600 в ванадии нарабатывается ~20 аppm, а ДЕМО РФ — ~680 аppm H [10].

Водород может специально вводиться в жидкометаллический теплоноситель для борьбы с оксидными отложениями. Другой канал поступления водорода в конструкционные материалы первой стенки ТЯР — непосредственно излучением из плазмы.

В настоящее время в качестве реакторного конструкционного материала рассматривают ванадиевые сплавы, содержащие титан — сильный гидридообразующий элемент [3, 11, 12]. Наиболее перспективный сплав для возможного использования в ТЯР — тройной сплав V–4% Ti–4% Cr. Цель работы — выявление закономерностей удержания водорода в сплавах V – Ti, насыщенных водородом, в зависимости от концентрации титана.

Материалы и методика

Первый этап — изготовление образцов сплавов V – Ti, заключался в выплавке лигатуры — сплава с максимальным содержанием титана V–10 масс. % Ti сплавлением иодидных ванадия и титана в вакуумно-дуговой печи типа МИФИ-9. Были приготовлены модельные сплавы с 0,5; 1; 5 и 10 % Ti путем добавления к лигатуре чистого ванадия. Содержание титана в сплавах определяли на микроанализаторе

“Camebax SX-50”. Эталоном для сравнения служил чистый ванадий. Отклонение составов сплавов от расчетных составило не более 5 %.

После многократной прокатки с промежуточными гомогенизирующими отжигами при температуре 810 °С до достижения конечной толщины ~ 0,25 мм образцы размерами 25 × 7 × 0,25 мм³ были отожжены в вакууме 10⁻³ Па при температуре 1273 К в течение 2 ч с последующим охлаждением с печью. Перед насыщением водородом образцы электрополировали до зеркального блеска в растворе H₂SO₄ (конц.) + 5 % этилового спирта.

Содержание водорода в исходных образцах, измеренное в анализаторе водорода RH-402 фирмы “Лесо”, было на уровне 0,0006 ± 0,0003 %. Насыщение сплавов водородом проводили в течение 2000 ч в автоклаве с температурой воды 620 К, в который подавали водород под давлением 16,8 МПа. Все образцы были взвешены на весах AND GR-202 с точностью ± 0,01 мг для последующего определения количества захваченного водорода. Перед исследованиями методом термодесорбционной спектрометрии (ТДС) был определен сигнал водорода от кассеты для образцов и установлено, что образцы с водородом дают сигнал на два с лишним порядка выше, поэтому сигнал от кассеты не учитывался. Исследование газовой выделенности проводили при скорости равномерного нагрева 2 К/с.

Измерено абсолютное количество захваченного в материалах водорода методом восстановительного плавления с индукционным нагревом образцов в печи в токе азота (в двух сериях экспериментов) на высокочувствительном газоанализаторе модели RHEN-602 фирмы “Лесо”.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры термодесорбции водорода из образцов сплавов ванадия. Наблюдаются два основных пика газовой выделенности: низко- и высокотемпературный. На всех спектрах присутствует низкотемпературный пик I в интервале температуры 780 – 790 К, высота которого постоянна, а положение по температурной шкале не зависит от состава сплава, и высокотемпературный пик II при 870 – 880 К, интенсивность и положение на температурной шкале которого определяются составом сплава. Как видно из рис. 1, увеличение содержания титана в ванадии приводит к изменению интенсивностей пиков I и II: если 0,5 масс.% Ti практически не изменяет соотношение высот пиков I и II, то 1 масс.% Ti увеличивает высоту пика I и подавляет интенсивность пика II, а 5 и 10 масс.% Ti наоборот — уменьшают высоту пика I

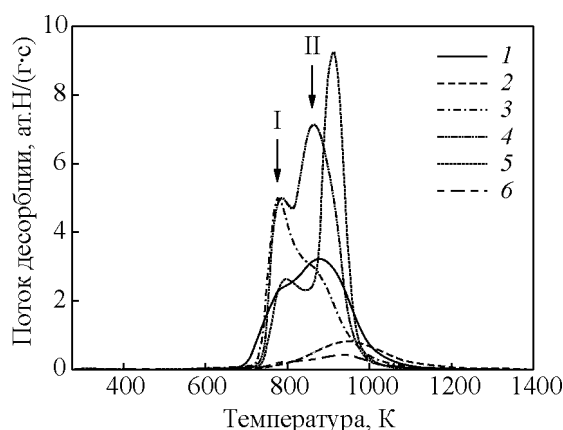


Рис. 1. Спектры термодесорбции водорода из сплавов ванадия: 1 – V; 2 – V + 0,5 % Ti; 3 – V + 1 % Ti; 4 – V + 5 % Ti; 5 – V + 10 % Ti; 6 – V + 5 % Fe, при скорости равномерного нагрева 2 К/с.

и увеличивают интенсивность пика II, причем с изменением содержания титана от 5 до 10 масс. % этот эффект более заметен. Из приведенных на рис. 1 спектров ТДС видно, что влияние титана на интенсивности пиков ТДС и положение пика II не монотонное.

На зависимости количества удерживаемого водорода от содержания Ti, определенного методом ТДС (рис. 2), видно, что 0,5 масс. % Ti почти в 3 раза уменьшает содержание водорода по сравнению с захватом его в ванадии, 1 масс. % Ti восстанавливает количество захваченного водорода, в сплаве V – 5%Ti наблюдается максимальное содержание водорода — ~5,5·10²⁰ ат. Н/г образца (отношение количества атомов водорода к количеству атомов сплава ат. Н/ат. V составляет ~ 4,5 %). С увеличением содержания Ti до

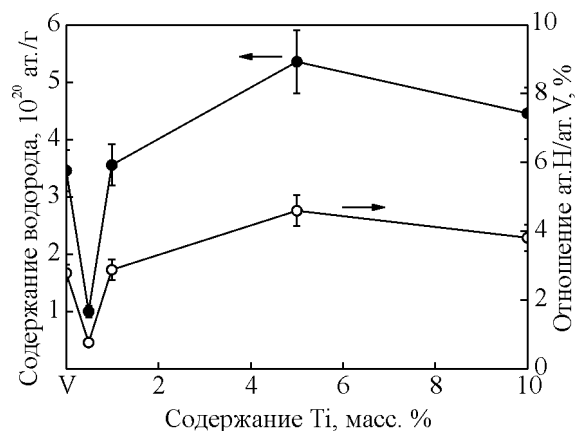


Рис. 2. Зависимость количества захваченного водорода от содержания титана в ванадии, вычисленное из результатов ТДС исследований.

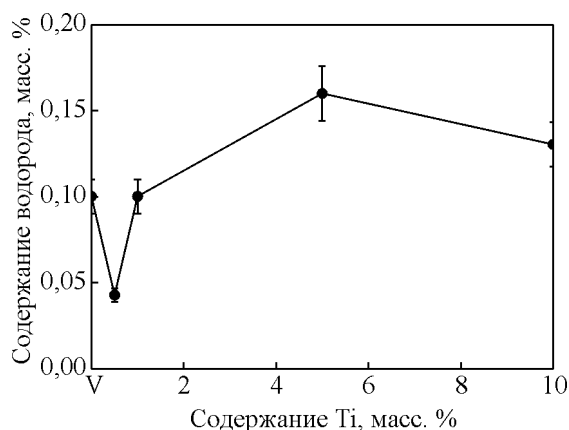


Рис. 3. Зависимость абсолютного количества захваченного водорода, от содержания титана в ванадии (газоанализатор RHEN-602).

10 % количество удерживаемого водорода снижается до $\sim 4,5 \cdot 10^{20}$ ат. Н/г образца (отношение ат. Н/ат. V $\sim 3,8$ %). Таким образом, влияние концентрации Ti в V на количество удерживаемого водорода также немонотонное, как и влияние на положение пика II в спектре ТДС (рис. 1).

На рис. 3 приведены результаты исследования абсолютного количества удерживаемого в сплавах V – Ti водорода, определенного в газоанализаторе RHEN-602. Ход зависимости количества захваченного водорода от содержания титана (рис. 3) подобен графику зависимости, полученному методом ТДС (рис. 2).

Закономерности захвата, удержания и выделения водорода, влияния на них легирующих элементов в металлах, в частности, Ti в V, во многом определяется тем, в каком состоянии водород находится в металлах. Считают [12 – 14], что водород в материалах может находиться в одном из следующих состояний: атомарное — H^0 , ионное — H^+ и H^- , молекулярное — H_2 , в соединениях с металлами — Me_mH_n (гидридах) и с примесями (например, CH_4 , H_2S). Кроме того, водород может образовывать комплексы с точечными дефектами, например с вакансиями — H_mV_n (V — вакансия, m и n — количество атомов водорода и вакансий в комплексе соответственно), с вакансиями и примесями — $H_mX_nV_k$ (X — примесь внедрения) и другие комплексы [15].

Наличие двух пиков газовыделения в спектрах ТДС свидетельствует о существовании в ванадии и его сплавах двух типов основных ловушек для водорода, введенного в образцы в автоклаве без радиационного повреждения структуры. Поскольку положение низкотемпературного пика I на температурной шкале не зависит от химического состава

материала (рис. 1), можно предположить, что в температурном интервале 780 – 790 К ловушками для водорода являются такие дефекты, на энергию связи которых с водородом и их водородоемкость не влияет присутствие атомов легирующих элементов в твердом растворе. Поскольку гидриды ванадия термически не стабильные — растворяются уже при температурах от ~ 270 К [16, 17], такими ловушками могут быть термические вакансии [15], дислокации, границы зерен и двойников, несплошности и другие наследственные дефекты, с которыми атомы водорода имеют положительную энергию связи. Например, в α -Fe энергия связи $H - V$ составляет 0,45 – 0,53 эВ; $H - V_m$ ($m > 4$) — 0,71 – 0,90 эВ; H -дислокация — 0,24 – 0,62 эВ; H -пора — 0,78 эВ; H -гелиевый пузырек — 0,75 – 0,70 эВ; $H - TiC$ — 0,29 эВ [12]. Расчетным путем показано [15], что в ванадии одна вакансия может удерживать 12 атомов водорода при одновременном их введении и 6 атомов водорода при их последовательном введении. В [6] показано, что в ванадиевых сплавах на количество захватываемого водорода влияет химический состав сплава. То, что интенсивность (высота) пика I зависит от содержания Ti, может свидетельствовать, например, о том, что атомы титана изменяют концентрацию данного типа ловушек и/или энергию связи их с атомами водорода.

Ловушки второго типа, выделение из которых водорода при нагреве формирует пик II, являются более эффективными ловушками для водорода. При этом как интенсивность, так и положение на температурной шкале пика II определяются концентрацией титана (рис. 1), причем влияние на них содержания Ti, как и влияние на количество удерживаемого водорода, немонотонное (рис. 2 и 3). Можно предположить, что наряду с захватом водорода в ловушки первого типа, он удерживается в гидридах титана или комплексных гидридах типа $Ti_{1-x}V_xH_2$, либо в γ -гидридах титана TiH_2 (рис. 4), поскольку стандартная энтальпия образования гидроксида титана меньше ($-144,4$ кДж/моль [18]), чем гидридов ванадия ($-39,9$ кДж/моль [19]).

В [20] было показано, что в исходном V присутствовали $0,08 \pm 0,01$ % O_2 и $0,0090 \pm 0,0003$ % N_2 , а в исходном сплаве V-5% Ti — $0,32 \pm 0,01$ % O_2 и $0,0064 \pm 0,0003$ % N_2 . В той же работе с использованием методов измерения внутреннего трения и рентгеновского фазового анализа установлено, что при малых концентрациях титан участвует в образовании различных комплексов Ti – O, Ti – O – V, $VTiO_x$ и т.п., а также нитридов в связи с тем, что энтальпии их образования значительно меньше, чем гидроксида титана (таблица), то есть титан в количестве 0,5 масс. %

Таблица

Стандартные энтальпии и энтропии образования гидроксида, оксидов и нитрида титана [21]

Соединение	TiH ₂	Ti ₂ O ₃	Ti ₃ O ₅	TiO ₂	TiN
$-\Delta H^0_{298}$, кДж/моль	122 – 147	1525 ± 8	2465 ± 18	937 – 949	281 – 340
S^0_{298} , Дж/(моль·К)	30	79,0 ± 0,8	130 ± 1	~50	30,0 ± 0,4

(0,53 ат. %) не участвует в формировании гидридов, а весь расходуется на связывание кислорода и азота, содержание которых в ванадии в сумме составляет 0,58 ат. % [20]. Казалось бы, это не должно приводить к снижению количества удерживаемого водорода в сплаве V – 0,5%Ti по сравнению с захватом водорода ванадием. Такое уменьшение количества водорода возможно в том случае, если кислород и азот в твердом растворе ванадия способствуют удержанию водорода, например, сильно искажают кристаллическую решетку, находясь в положениях внедрения, а такие места являются местами стока вакансий и, соответственно, удержания атомов водорода. Выведение титаном кислорода и азота из твердого раствора уменьшает количество таких ловушек и происходит снижение концентрации водорода в сплаве V – 0,5%Ti (рис. 2 и 3).

С увеличением содержания Ti до 1 и 5 масс.% количество удерживаемого водорода снова возрастает, поскольку лишь часть титана участвует в образовании оксидов и нитридов, а остальная часть формирует гидриды, температура распада которых 870 К и выше, что видно из сопоставления температуры пика II на рис. 1 и температуры распада γ гидроксида титана на рис. 4.

В [22] показано, что при содержании ~ 10 % Ti ванадий начинает отбирать часть электронной плотности у титана. Следовательно, снижение электронной плотности атомов титана приводит к меньшему количеству формируемых им гидридов и соответ-

ственно к снижению количества удерживаемого сплавом V – 10% Ti водорода по сравнению с захватом водорода сплавом V – 5% Ti (рис. 2 и 3).

Таким образом, влияние концентрации титана на захват и удержание водорода сплавами ванадия не монотонное, причем особенности поведения водорода в сплавах V – Ti встречаются в тех же концентрационных интервалах (десятиые доли процента и свыше 5 % Ti), что и немонотонные зависимости от содержания Ti механических и жаропрочных свойств [3, 23], внутреннего трения [20], закономерностей захвата и выделения гелия [24], параметров гелиевой пористости и газового распухания [25].

Выводы

1. Установлено, что в спектрах выделения водорода из сплавов V – Ti, насыщенных водородом в автоклаве, наблюдаются два пика: низкотемпературный в интервале 780 – 790 К, высота которого зависит, а положение по температурной шкале не зависит от состава сплава, и высокотемпературный при 870 – 880 К, интенсивность и положение которого на температурной шкале определяются составом сплава.

2. Показано, что в ванадиевых сплавах титан немонотонно влияет на количество удерживаемого водорода: по сравнению с захватом водорода ванадием добавка 0,5 % Ti уменьшает, добавки 1 и 5 % Ti увеличивают, а 10 % Ti снова снижает количество водорода в сплаве.

3. Предложено физическое объяснение появления двух пиков термодесорбции водорода и немонотонного влияния титана в ванадии на количество удерживаемого водорода.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры “Физика плазмы” НИЯУ МИФИ А.А. Писареву и Ю.М. Гаспаряну за организацию и содействие в проведении термодесорбционных исследований.

Работа выполнена в рамках Центра Ядерных систем и материалов при государственной поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (соглашение с Минобрнауки РФ от 27 августа 2013 г. № 02.а03.21.0005)

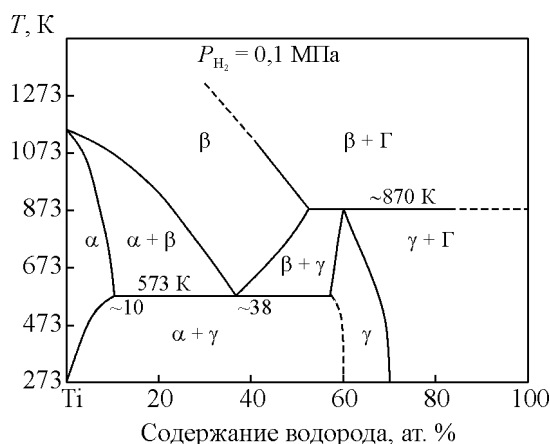


Рис. 4. Диаграмма состояния системы Ti – H: α - и β -твердые растворы водорода в α - и β -титане; γ -TiH₂ [17].

Литература

1. Smith D.L., Loomis B.A., Diercks D.R. Vanadium-base alloys for fusion reactor applications — a review. *J. Nucl. Mater.*, 1985, v. 135, p. 125 – 139.
2. Вотинов С.Н., Дедюрин А.И. Сплавы на основе ванадия — перспективный малоактивируемый конструкционный материал для термоядерных реакторов. ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы, 1995, вып. 1 (52), с. 66 – 73.
3. Калин Б.А., Стальцов М.С., Чернов И.И. Малоактивируемые ванадиевые сплавы для ядерной и термоядерной энергетики: принципы легирования, радиационная стойкость, проблема гелия и водорода. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2011, т. 2, № 4, с. 320 – 344.
4. Алексеев О.А., Вотинов С.Н., Губкин И.Н. и др. Ванадиевый сплав, плакированный ферритной нержавеющей сталью — материал оболочек ТВЭЛов реакторов на быстрых нейтронах. Перспективные материалы, 2009, № 4, с. 34 – 42.
5. Vuxbaum R.E., Subramanian R., Park J.H., Smith D.L. Hydrogen transport and embrittlement for palladium coated vanadium-chromium-titanium alloys. *J. Nucl. Mater.*, 1996, v. 233 – 237, p. 510 – 512.
6. Natesan K., Soppet W.K. Performance of V – Cr – Ti alloys in a hydrogen environment. *J. Nucl. Mater.*, 2000, v. 283 – 287, p. 1316 – 1321.
7. Aoyagi K., Torres E.P., Suda T., Ohnuki S. Effect of hydrogen accumulation on mechanical property and microstructure of V – Cr – Ti alloys. *J. Nucl. Mater.*, 2000, v. 283 – 287, p. 876 – 879.
8. Chen J., Xu Z., Yang L. The influence of hydrogen on tensile properties of V-base alloys developed in China. *J. Nucl. Mater.*, 2002, v. 307 – 311, p. 566 – 570.
9. Torres P., Aoyagi K., Suda T. et al. Hydride formation and fracture of vanadium alloys. *J. Nucl. Mater.*, 2002, v. 307 – 311, p. 625 – 629.
10. Блохин Д.А., Чернов В.М. Ядерное образование водорода и гелия в конструкционных материалах энергетических реакторов деления и термоядерного синтеза. ВАНТ. Сер.: Материаловедение и новые материалы, 2008, вып. 2(71), с. 112 – 122.
11. Петров В.С., Бондаренко Г.Г., Васильевский В.В., Логинов Б.А. Исследование взаимодействия титана и ниобия с водородом методами термогравиметрии и сканирующей зондовой микроскопии. Перспективные материалы, 2005, № 6, с. 26 – 29.
12. Калин Б.А., Калашников А.Н., Чернов И.И., Шмаков А.А. Водородные проблемы в реакторных материалах. В сб.: Доклады VII Междунар. школы молодых ученых и специалистов IHISM'11 JUNIOR “Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами”, г. Звенигород, 24 - 28 октября 2011 г., Саров, 2012, с. 10 – 54.
13. Физическое материаловедение. Под общей ред. Б.А. Калина. Том 6. Конструкционные материалы ядерной техники. Б.А. Калин, П.А. Платонов, Ю.В. Тузов и др. М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2012, 736 с.
14. Вайнман А.Б., Мелехов Р.К., Смяин О.Д. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. Киев: Наукова думка, 1991, 272 с.
15. Gui Li-Jiang, Liu Yue-Lin, Wangb Wei-Tian et al. First-principles investigation on vacancy trapping behaviors of hydrogen in vanadium. *J. Nucl. Mater.*, 2013, v. 442, p. S688 – S693.
16. Музгин В.Н., Хамзина Л.Б., Золотавин В.Л. Аналитическая химия ванадия. М.: Наука, 1981, 216 с.
17. Барабаш О.М., Коваль Ю.Н. Структура и свойства металлов и сплавов: Кристаллическая структура металлов и сплавов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1986, 598 с.
18. Barin I. Thermochemical Data of Pure Substances. Part I–III. VCH Verlags Gesellschaft, Weinheim, 1995, 1684 p.
19. Golubkov A.N., Yukhimchuk A.A.. Equilibrium pressure of protium and deuterium over vanadium dihydrate phase. In: Proc. of NATO Advanced Research Workshop on Hydrogen Materials Science and Chemistry of Materials, 2 – 8 Sept., 1999, Katsiveli, Yaltao, Ukraine, p. 255 – 264.
20. Ананьин В.М., Калин Б.А., Корчагин О.Н. и др. Исследование методом внутреннего трения взаимодействия кислорода с титаном в ванадии. Физика и химия обработки материалов, 2010, № 2, с. 66 – 70.
21. Рузинов Л.П., Гуляницкий Б.С. Равновесные превращения металлургических реакций. Справочник. М.: Металлургия, 1975, 416 с.
22. Вотинов С.Н., Колотушкин В.П., Парфенов А.А. Радиационно-стойкие сплавы на основе ванадия. Атомная наука и промышленность (<http://bus.znate.ru/docs/index-27154.html?page=3>).
23. Ефимов Ю.В., Барон В.В., Савицкий Е.М. Ванадий и его сплавы. М.: Наука, 1969, 248 с.
24. Чернов И.И., Стальцов М.С., Калин Б.А. и др. Термодесорбционное исследование поведения гелия в сплавах ванадий – титан, облученных ионами He⁺ при комнатной температуре. Физика и химия обработки материалов, 2012, № 3, с. 22 – 29.
25. Чернов И.И., Стальцов М.С., Калин Б.А. и др. Закономерности формирования гелиевой пористости в ванадиевых сплавах в зависимости от химического состава. Атомная энергия, 2010, т. 109, вып. 3, с. 141 – 148.

References

1. Smith D.L., Loomis B.A., Diercks D.R. Vanadium-base alloys for fusion reactor applications — a review. *J. Nucl. Mater.*, 1985, vol. 135, pp. 125 – 139.
2. Votinov S.N., Dedyurin A.I. Splavy na osnove vanadiya — perspektivny maloaktiviruyemy konstruktсионny material dlya termoyadernykh reaktorov [Vanadium based alloys — prospective low-activation structural materials for thermonuclear reactors]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Materialovedenie i novye materialy — Problems of atomic science and technology. Ser. Materials science and new materials*, 1995, iss. 1(52), pp. 66 – 73.
3. Kalin B.A., Staltsov M.S., Chernov I.I. Maloaktiviruyemye vanadiyevye splavy dlya yadernoy i termo-

- yadernoy energetiki: printsiy legirovaniya, radiatsionnaya stoykost, problema geliya i vodoroda [Lowactivation vanadium alloys for nuclear and thermonuclear energy: principles of alloying, radiation resistance, problem of helium and hydrogen]. *Yadernaya fizika i inzhiniring — Nuclear Physics and Engineering*. 2011, vol. 2, no. 4, pp. 320 – 344.
4. Alekseyev O.A., Votinov S.N., Gubkin I.N. et al. Vana-diyevy splav, plakirovanny ferritnoy nerzhavayushchey stalyu — material obolochek TVELov reaktorov na bystrykh neytronakh [Vanadium alloy plated with ferritic stainless steel as material for fuel rods of fast neutrons reactors]. *Perspektivnye materialy — Advanced materials*, 2009, no. 4, pp. 34 – 42.
 5. Buxbaum R.E., Subramanian R., Park J.H., Smith D.L. Hydrogen transport and embrittlement for palladium coated vanadium-chromium-titanium alloys. *J. Nucl. Mater.*, 1996, vol. 233 – 237, pp. 510 – 512.
 6. Natesan K., Soppet W.K. Performance of V – Cr – Ti alloys in a hydrogen environment. *J. Nucl. Mater.*, 2000, vol. 283 – 287, pp. 1316 – 1321.
 7. Aoyagi K., Torres E.P., Suda T., Ohnuki S. Effect of hydrogen accumulation on mechanical property and microstructure of V – Cr – Ti alloys. *J. Nucl. Mater.*, 2000, vol. 283 – 287, pp. 876 – 879.
 8. Chen J., Xu Z., Yang L. The influence of hydrogen on tensile properties of V-base alloys developed in China. *J. Nucl. Mater.*, 2002, vol. 307 – 311, pp. 566 – 570.
 9. Torres P., Aoyagi K., Suda T. et al. Hydride formation and fracture of vanadium alloys. *J. Nucl. Mater.*, 2002, vol. 307 – 311, pp. 625 – 629.
 10. Blokhin D.A., Chernov V.M. Yadernoye obrazovaniye vodoroda i geliya v konstruktsionnykh materialakh energeticheskikh reaktorov deleniya i termoyadernogo sinteza [Nucleation of hydrogen and helium in structural materials of fusion and fission reactors]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Materialovedenie i novye materialy — Problems of atomic science and technology. Ser. Materials science and new materials*, 2008, iss. 2(71), pp. 112 – 122.
 11. Petrov V.S., Bondarenko G.G., Vasilyevsky V.V., Loginov B.A. Issledovaniye vzaimodeystviya titana i niobiya s vodorodom metodami termogravimetrii i skaniruyushchey zondovoy mikroskopii [Study of titanium and niobium interaction with hydrogen by thermo-gravimetry and scanning probe microscopy methods]. *Perspektivnye materialy — Advanced materials*, 2005, no. 6, pp. 26 – 29.
 12. Kalin B.A., Kalashnikov A.N., Chernov I.I., Shmakov A.A. *Vodorodnye problemy v reaktornykh materialakh* [Problems of hydrogen in reactor materials]. Proc. VII Int. Conf. IHISM'11 Junior "Interaction of hydrogen isotopes with structural materials", Zvenigorod, Russia, 24 – 28 Oct. 2011, Sarov Publ., 2012, pp. 10 – 54. (In Russ)
 13. Kalin B.A. Physical material science. Vol.6 Structural materials of nuclear engineering. Moscow, MEPhI Publ., 2012, 736 p. (In Russ).
 14. Vaynman A.B., Melekhov R.K., Smiyani O.D. *Vodorodnoye okhrupchivaniye elementov kotlov vysokogo davleniya* [Hydrogen brittleness of high-pressure boilers]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1991, 272 p.
 15. Gui Li-Jiang, Liu Yue-Lin, Wangb Wei-Tian et al. First-principles investigation on vacancy trapping behaviors of hydrogen in vanadium. *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 442, pp. S688 – S693.
 16. Muzgin V.N., Khamzina L.B., Zolotavin V.L. *Ana-liticheskaya khimiya vanadiya* [Analytical chemistry of vanadium]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 216 p.
 17. Barabash O.M., Koval Yu.N. *Struktura i svoystva metallov i splavov: Kristallicheskaya struktura metallov i splavov* [Structure and properties of metals and alloys: Crystal structure of metals and alloys]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1986, 598 p.
 18. Barin I. Thermochemical Data of Pure Substances. Part I – III. VCH Verlags Gesellschaft, Weinheim, 1995, 1684 p.
 19. Golubkov A.N., Yukhimchuk A.A.. Equilibrium pressure of protium and deuterium over vanadium dihydrate phase. In: Proc. of NATO Advanced Research Workshop on Hydrogen Materials Science and Chemistry of Materials, 2 - 8 Sept., 1999, Katsiveli, Yaltoa, Ukraine, p. 255 – 264.
 20. Anan'in V.M., Kalin B.A., Korchagin O.N. et al. Investigation of oxygen–titanium interaction in vanadium by internal friction method. *Inorganic Mater.: Appl. Res.*, 2012, vol. 3, no. 3, p. 243 – 247.
 21. Ruzinov L.P., Gulyanitsky B.S. *Ravnovesnye pre-vrashcheniya metallurgicheskikh reaktsy* [Equilibrium transformations of metallurgical reactions]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975, 416 p.
 22. Votinov S.N., Kolotushkin V.P., Parfenov A.A. *Radiat-sionno-stoykiye splavy na osnove vanadiya* [Radiation resistant vanadium based alloys]. Atomic science and technology (<http://bus.znate.ru/docs/index-27154.html?page=3>).
 23. Yu.V. Yefimov, V.V. Baron, Ye.M. Savitsky. *Vandy i ego splavy* [Vanadium and its alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 248 p.
 24. Chernov I.I., Staltsov M.S., Kalin B.A. et al. Termodesorbtsionnoye issledovaniye povedeniya geliya v splavakh vanady-titan, obluchennykh ionami He⁺ pri komnatnoy temperature [Thermal-desorption study of helium in vanadium-titanium alloys irradiated by He⁺ under room temperature]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment*, 2012, no. 3, pp. 22 – 29.
 25. Chernov I.I., Staltsov M.S., Kalin B.A. et al. Zakonome-rnosti formirovaniya geliyevoy poristosti v vana-diyevykh splavakh v zavisimosti ot khimicheskogo sostava [Laws of formation of gas porosity in vanadium alloys depending on chemical composition]. *Atomnaya energiya — Atomic energy*, 2010, vol. 109, iss. 3, pp. 141 – 148.

Статья поступила в редакцию 18.03.2014 г.

Аунг Чжо Зо — Национальный исследовательский ядерный университет “Московский инженерно-физический институт”, аспирант, специализируется в области физики твердого тела. E-mail: mephist.aung@gmail.com

Чернов Иван Ильич — Национальный исследовательский ядерный университет, “Московский инженерно-физический институт”, доктор физико-математических наук, профессор, профессор, специалист в области физики твердого тела и физического материаловедения. E-mail: i_chernov@mail.ru

Стальцов Максим Сергеевич — Национальный исследовательский ядерный университет “Московский инженерно-физический институт”, кандидат физико-математических наук, доцент, специалист в области физики твердого тела и физического материаловедения. E-mail: m.staltsov@gmail.com

Калин Борис Александрович — Национальный исследовательский ядерный университет “Московский инженерно-физический институт”, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, специалист в области физики твердого тела и физического материаловедения. E-mail: BAKalin@mephi.ru

Ефимов Виталий Сергеевич — Национальный исследовательский ядерный университет “Московский инженерно-физический институт”, аспирант, специализируется в области физики плазмы.

Hydrogen retention by vanadium-titanium alloys

Aung Kyaw Zaw, I. I. Chernov, M. S. Staltsov, B. A. Kalin, V. S. Efimov

Hydrogen retention in vanadium and its binary alloys with titanium have been investigated by means of hydrogen thermal desorption spectrometry and the gas analyzer RHEN-602 of the “Leco”. The samples were saturated with hydrogen for 2,000 hours in an autoclave with a temperature of 620 K, where hydrogen is fed at a pressure of 16.8 MPa. It is shown that in V – Ti alloys there are two main types of traps for hydrogen and of which the hydrogen release occurs in the temperature range 780 – 790 (peak I) and 870 – 880 K (peak II). The position of peak I on the temperature scale does not depend on the alloy composition, and the intensity and position on the temperature scale of peak II are determined by the alloy composition. Titanium nonmonotonically affects the amount of hydrogen retained: in comparison with the hydrogen trapping in vanadium, dopant of 0,5% Ti decreases, alloying by 1 and 5 % Ti is increased, and 10 % Ti again reduce the amount of hydrogen in the alloy. A physical explanation of the appearance of two peaks of hydrogen thermal desorption and non-monotonic influence of titanium in vanadium on the amount of hydrogen is retained.

Keywords: vanadium, vanadium alloys, hydrogen, hydrogen retention, hydrogen thermal desorption.

Aung Kyaw Zaw — National Research Nuclear University “Moscow Engineering Physics Institute”, postgraduate student, e-mail: mephist.aung@gmail.com

Chernov Ivan — National Research Nuclear University “Moscow Engineering Physics Institute”, Dr.Sci., professor, e-mail: i_chernov@mail.ru

Staltsov Maxim — National Research Nuclear University “Moscow Engineering Physics Institute”, Ph.D., associate professor, e-mail: m.staltsov@gmail.com

Kalin Boris — National Research Nuclear University “Moscow Engineering Physics Institute”, Dr.Sci., professor, Head of department, e-mail: BAKalin@mephi.ru

Efimov Vitaly — National Research Nuclear University “Moscow Engineering Physics Institute”, postgraduate student.