

УДК: 669.778:669.295

DOI: 10.53403/9785951505378_2023_116

Исследование влияния водорода высокого давления на механические свойства и структуру титанового сплава VT20

**А. В. Ялышева, И. Е. Бойцов, М. В. Казимов,
И. Л. Малков, Е. В. Шевнин**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров

arkad@triton.vniief.ru

В настоящее время перспективным направлением в области энергетики является развитие водородной энергетики. В связи с этим актуальной задачей материаловедения является изучение закономерностей влияния водорода на свойства конструкционных материалов (КМ). Известно, что воздействие водорода на КМ приводит к снижению их пластичности – так называемому водородному охрупчиванию, вследствие которого может происходить непредсказуемое разрушение конструкций. Из титановых сплавов наиболее склонны к водородному охрупчиванию псевдо- α -сплавы, что связано с большей растворимостью водорода в β -фазе. К сожалению, на сегодняшний день вопрос водородного охрупчивания полностью не изучен, поэтому необходимо исследовать КМ в условиях непосредственного воздействия водорода.

Было исследовано влияния кратковременного (до 10 мин) воздействия газообразного водорода высокого давления на механические свойства и структуру титанового псевдо- α -сплава VT20.

Водородостойкость титанового сплава VT20 оценивалась сравнением его характеристик механических свойств, полученных при испытании цилиндрических образцов типа IV, № 9 ГОСТ 1497-84 на растяжение в среде гелия и в среде водорода при давлении 80 МПа и температурах 20, 200 и 300 °С. Исследование микроструктуры материала образцов проводилось как до воздействия на них водорода, так и после него. Перед испытаниями заготовки образцов отжигались при температуре 820 ± 10 °С в течение 25 ± 2 мин.

Результаты исследования показали, что влияния водорода на механические свойства и структуру сплава VT20 не обнаружено.

Введение

В настоящее время спектр применения водорода в традиционных отраслях промышленности активно расширяется. Одним из наиболее перспективных направлений применения водорода является водородная энергетика. Для ее дальнейшего развития необходимо решить ряд проблем, связанных с транспортировкой и хранением водорода.

Детали, используемые в распределительной линии водородной топливной станции, очень критичны с точки зрения безопасности и надежности. Особенно это важно для быстросъемных соединений, работающих при давлении от 35 до 70 МПа [1]. Одной из проблем изделий, применяющихся в водородной энергетике, является взаимодействие конструкционных материалов (КМ) с водородом.

Известно, что воздействие водорода на КМ приводит к снижению их пластичности, вследствие чего может происходить непредсказуемое разрушение конструкций. Это явление водородного охрупчивания. Водородное охрупчивание присуще всем КМ, в том числе и титановым сплавам [2]. Титановые сплавы обладают оптимальным комплексом свойств (малый удельный вес, высокая коррозионная стойкость, большая прочность и жаропрочность, достаточная пластичность при криогенных температурах), что делает их перспективным материалом водородной энергетике.

Исследуемый титановый сплав ВТ20 принадлежит к системе Ti–Al–Zr–Mo–V и относится к категории псевдо- α -сплавов. Структура псевдо- α -сплава состоит из α -фазы и небольшого количества β -фазы (5–7 %) [3]. Титановый сплав ВТ20 применяется для изготовления изделий, работающих длительно при температурах до 500 °С или кратковременно до 800 °С [4]. Данный сплав обладает хорошей свариваемостью, высокой термической стабильностью и коррозионной стойкостью [5]. Содержание водорода в сплаве ВТ20 не должно превышать 0,015 % [2].

Методика исследования

Водородостойкость титанового сплава ВТ20 оценивалась сравнением его характеристик механических свойств, полученных при испытаниях цилиндрических образцов типа IV, № 9 ГОСТ 1497-84 на растяжение в среде гелия и в среде водорода при давлении 80 МПа и температурах 20, 200 и 300 °С. Перед испытаниями заготовки образцов отжигались на воздухе при температуре 820 ± 10 °С в течение 25 ± 2 мин.

Испытания образцов на растяжение в среде гелия и в среде водорода проводились на установке для испытания образцов на растяжение в газообразной среде высокого давления следующим образом. После монтажа образца в камеру высокого давления и ее герметизации установка и ее газовые коммуникации вакуумировались до остаточного давления 10^{-2} мбар. После нагрева отвакуумированной камеры с образцом до температуры испытаний в нее напускался газ (водород или гелий) под давлением 80 МПа. Время воздействия газовой среды и температуры на образец до начала его растяжения составляло

10 мин. Скорость перемещения подвижной тяги при растяжении составляла 2 мм/мин, что соответствовало скорости деформации образца $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Для каждой испытательной среды и при каждом значении температуры испытанию подвергались три образца. По результатам испытаний определялись следующие характеристики механических свойств [6]: $\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление (относительная погрешность определения $\pm 4,7\%$); $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести (относительная погрешность определения $\pm 4,7\%$); δ – относительное удлинение после разрыва (абсолютная погрешность определения $\pm 0,1\%$); ψ – относительное сужение после разрыва (абсолютная суммарная погрешность определения $\pm 0,4\%$).

Влияние водорода на характеристики механических свойств для каждой температуры (T) испытаний оценивалось при помощи показателя ΔX , вычисленного по формуле

$$\Delta X = \frac{X(\text{He}) - X(\text{H}_2)}{X(\text{He})} \cdot 100\%,$$

где $X(\text{He})$ – среднее арифметическое значение соответствующей характеристики, полученное при испытаниях в гелии; $X(\text{H})$ – то же самое при испытаниях в водороде.

Значение ΔX соответствует вызванному воздействием водорода относительному снижению характеристики механических свойств, выраженному в процентах.

Для исследования микроструктуры сплава ВТ20 заготовка для шлифа заливалась эпоксидной смолой в специальной форме. Приготовление шлифа для металлографического исследования проводилось на шлифовально-полировальном станке: шлифование на шкурках № P120 и P240, полирование на ватмане алмазными пастами с зернистостью 9 и 3 мкм и окончательная обработка исследуемой поверхности на сукне с помощью суспензии оксида алюминия (размер частиц 0,05 мкм). Травление шлифов выполнялось в реактиве следующего состава: 2 мл азотной кислоты, 2 мл плавиковой кислоты и 96 мл воды. Микроструктура шлифа исследовалась на оптическом микроскопе.

Результаты исследования

Химический состав сплава ВТ20 представлен в табл. 1 [7].

Таблица 1

Химический состав сплава ВТ20, % (по массе)

Al	Mo	V	Zr	C	Fe	Si	O ₂	N ₂	H ₂	Ti	Σ
5,5–7,0	0,5–1,8	0,8–2,3	1,4–2,5	≤0,10	≤0,30	≤0,15	≤0,15	≤0,05	≤0,015	Основа	≤0,30

Примечание: Σ – сумма прочих примесей.

Результаты испытаний образцов из сплава ВТ20 на растяжение в среде гелия и в среде водорода при давлении 80 МПа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов из сплава ВТ20 на растяжение в среде гелия и в среде водорода при давлении 80 МПа

Среда	Температура, °С	Характеристики механических свойств*			
		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Гелий	20	1020	970	18,3	56,3
	200	823	723	20,8	67,0
	300	750	620	19,5	68,0
Водород	20	1020	967	18,8	55,3
	200	800	687	20,8	67,3
	300	747	610	20,7	66,3

Примечание: * – среднее значение по трем измерениям.

На рис. 1 и 2 показано влияние водорода на прочностные и пластические характеристики сплава ВТ20.

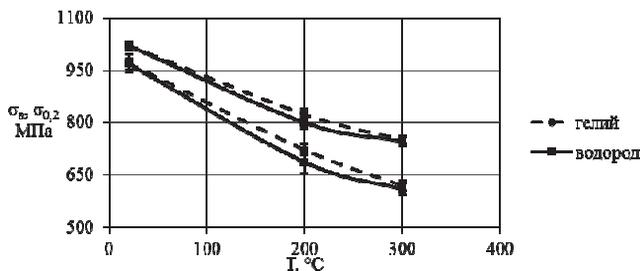


Рис. 1. Зависимость временного сопротивления σ_b и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ от температуры испытания на растяжение в среде гелия и в среде водорода

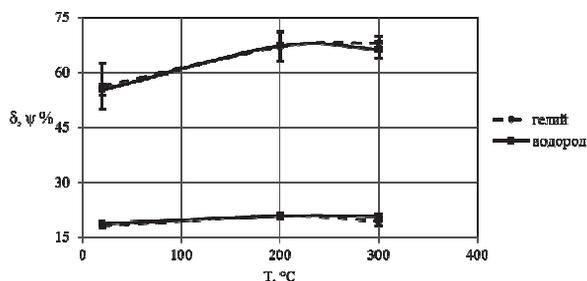


Рис. 2. Зависимость относительного удлинения после разрыва δ и относительного сужения после разрыва ψ от температуры испытания на растяжение в среде гелия и в среде водорода

В табл. 3 представлены значения относительного снижения характеристик механических свойств (показатель Δ) сплава ВТ20, вызванного воздействием водорода.

Таблица 3

Относительное снижение характеристик механических свойств сплава ВТ20, вызванное воздействием водорода

Температура, °С	Относительное снижение характеристик, %			
	$\Delta\sigma_B$	$\Delta\sigma_{0,2}$	$\Delta\delta$	$\Delta\psi$
20	0	0,3	-2,7*	1,8
200	2,8	5,0	0	-0,4
300	0,4	1,6	-6,1	2,5

Примечание: * – знак «минус» показывает, что при испытаниях в водороде было получено более высокое значение характеристики, чем при испытаниях в гелии.

Как видно из табл. 2, 3 и рис. 1 и 2, воздействие водорода в течение 10 мин при давлении водорода 80 МПа и температуре в диапазоне от 20 °С до 300 °С не оказало заметного отрицательного влияния на характеристики механических свойств сплава ВТ20.

Микроструктуры образцов из сплава ВТ20 после испытаний на растяжение в среде гелия и в среде водорода представлены на рис. 3 и 4.



Рис. 3. Микроструктура образца из сплава ВТ20 после испытания на растяжение в среде гелия

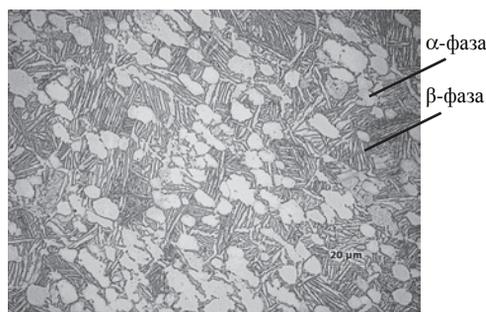


Рис. 4. Микроструктура образца из сплава ВТ20 после испытания на растяжение в среде водорода

Как видно из рис. 3 и 4, микроструктура образцов из сплава ВТ20 после термической обработки состоит из α -фазы глобулярно-пластинчатого типа и частиц β -фазы по границам α -фазы. Такая структура получается в результате высокотемпературной пластической деформации в $\alpha + \beta$ -области с последующим отжигом. Микроструктура образца из сплава ВТ20 после испытания на растяжение в среде водорода не изменилась.

Заключение

Результаты испытаний образцов из титанового сплава ВТ20 на растяжение в среде гелия и в среде водорода показали, что влияния воздействия водорода на механические свойства и микроструктуру сплава в течение 10 минут при давлении водорода 80 МПа и температуре от 20 до 300 °С не обнаружено.

Таким образом, в условиях испытаний титановый сплав ВТ20 показал себя как водородостойкий сплав.

Список литературы

1. Barthélémy H., Allidières L. Gaseous hydrogen refueling stations: selection of materials for high pressure hydrogen fueling connectors [Electronic resource]. – <https://h2tools.org/bibliography/gaseous-hydrogen-refuelling-stations-selection-materials-hydrogen-high-pressure> (дата обращения: 10.02.2022).
2. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Буханова А. А. Механические свойства титана и его сплавов. – М.: Металлургия, 1974. С. 544.
3. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1981. С. 416.
4. Борисова Е. А. Металлография титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1980. С. 464.
5. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. С. 368.
6. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытания на растяжение. – М.: Стандартиформ, 1984. С. 78.
7. ГОСТ 19807-91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. – М.: Изд-во стандартов, 1991. С. 4.