

DOI: 10.53403/9785951505156_2022_64

Влияние водорода на механические свойства титанового сплава ВТ9

И. П. Максимкин, И. Е. Бойцов, И. Л. Малков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров

Исследовано влияние воздействия газообразного водорода на характеристики механических свойств и структуру жаропрочного двухфазного титанового сплава ВТ9. Приведены результаты испытаний на растяжение стандартных цилиндрических образцов как в среде водорода, так и в инертной среде при давлении 80 МПа в интервале температур 20-600 °С. Показано, что сплав ВТ9 устойчив в среде водорода при давлениях до 80 МПа и температурах до 400 °С в течение времени до двух часов.

Введение

Рекомендации по применению титановых сплавов в среде газообразного водорода хотя и имеются [1], но они достаточно скудны и противоречивы, что и отражено в монографии Б. А. Колачева [2].

Как известно, титан интенсивно поглощает водород с образованием дисперсных или пластинчатых выделений гидридов при резком снижении ударной вязкости. При этом водород до появления гидридных выделений в довольно широком интервале концентраций не оказывает существенного влияния на предел прочности и текучести титановых сплавов [3]. Динамика насыщения водородом и его концентрационное распределение в титановых сплавах, помещенных в газообразный водород, существенно зависят от их химического состава, состояния поверхности, температурно-временных параметров наводороживания. При этом влияние поверхностных окисных пленок значительно: чем выше температура их образования, тем меньше скорость поглощения водорода [4].

Цель настоящей работы – определение температурно-временного интервала применимости титанового сплава ВТ9 в среде газообразного водорода путем сравнения характеристик его механических свойств в среде водорода и гелия при давлении 80 МПа в интервале температур 20–600 °С после их выдержки в соответствующих средах в течение 5 и 120 минут.

Методика исследований

Исследования влияния воздействия водорода на механические свойства жаропрочного двухфазного сплава ВТ9 (Ti – основа; 5,8–7,0 % Al; 2,8–3,8 % Mo; 1,0–2,0 % Zr; 0,2–0,35 % Si) проводились на стандартных цилиндрических образцах (тип IV, № 9 ГОСТ 1497-84) с диаметром рабочей части 3 мм. Образцы вырезались в продольном направлении из прутка диаметром 30 мм в горячекатаном состоянии. Заготовки образцов подвергались термообработке по режиму: нагрев при 920 ± 7 °С, выдержка (25–30) минут, охлаждение на воздухе; нагрев при 530 ± 7 °С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе.

Подготовка образцов заключалась в их промывке в спирте этиловом ректифицированном, при этом естественный окисный слой (из-под реза) с поверхностей образцов преднамеренно не удалялся.

Испытания на растяжение в газовых средах проводились на специальной лабораторной установке, принципиальная схема которой приведена в работе [5]. После монтажа образца в камеру высокого давления и ее герметизации установка и ее газовые коммуникации вакуумировались до остаточного давления 10^{-2} мбар, а затем дважды промывались испытательной средой при давлении от 0,5 до 1,0 МПа, после чего опять вакуумировались. 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 5 (кратковременные испытания) или 120 минут. Скорость перемещения подвижной тяги при растяжении составляла 2 мм/мин, что соответствовало начальной скорости деформации образца $2 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹. В каждой среде при каждом значении температуры испытывалось по три образца. В работе использовался водород технический с объемной долей примесей не более 0,01 % (марка А ГОСТ 3022-80) и гелий технический (марка Б ТУ 51-940-80). По результатам испытаний определялись следующие механические свойства: временное сопротивление σ_b и условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ (относительная погрешность определения не более $\pm 4,7$ % при доверительной вероятности 0,95), относительное удлинение после разрыва δ и относительное сужение после разрыва ψ (абсолютная погрешность определения не более $\pm 0,1$ % и $\pm 0,4$ % при доверительной вероятности 0,95 соответственно).

Анализ и фотографирование микроструктуры проводились на микроскопе «Neophot 2». Измерение микротвердости осуществлялось в соответствии с ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» на приборе ПМТ-3 при нагрузке 2 Н и выдержке в течение 15 секунд. На каждом образце измерение микротвердости проводилось в трех точках.

Результаты исследований и их обсуждение

При кратковременных испытаниях образцов на растяжение в среде водорода и гелия при комнатной температуре механические свойства сплава практически совпадают: $\sigma_b = 1130\text{--}1120$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1016\text{--}993$ МПа, $\delta = 14,4\text{--}15,1$ %, $\psi = 36,6\text{--}40,1$ % (рис. 1,а). При 600 °С прочностные характеристики сплава также практически совпадают: $\sigma_b = 504\text{--}562$ МПа, $\sigma_{0,2} = 444\text{--}487$ МПа, однако характеристики пластичности сплава в водороде существенно меньше: $\delta = 17,8$ %, $\psi = 54,4$ % (см. рис. 1,а) по сравнению с испытаниями в гелии ($\delta = 51,8$ %, $\psi = 100$ %). То есть воздействие водорода привело к снижению относительного удлинения примерно на ≈ 66 %, а относительное сужение – на $\approx 45,6$ %.

После двухчасовой выдержки образцов в водороде при давлении 80 МПа в интервале температур 20–400 °С механические свойства сплава незначительно отличаются от аналогичных характеристик, полученных при кратковременных испытаниях в среде водорода. Так, при 400 °С их номинальные значения составляют (рис. 1,б): $\sigma_b = 802$ МПа, $\sigma_{0,2} = 592$ МПа, $\delta = 17,2$ %, $\psi = 59,4$ %; а при кратковременных испытаниях в среде водорода при этой же температуре $\sigma_b = 881$ МПа, $\sigma_{0,2} = 643$ МПа, $\delta = 14,9$ %, $\psi = 50$ %.

Увеличение температуры двухчасовых испытаний до 500 °С приводит к ярко выраженному водородному охрупчиванию сплава вплоть до полного исчезновения пластичности при уровне прочностных характеристик $\sigma_b \cong \sigma_{0,2} = 350$ МПа.

Очевидно, что в принятых условиях испытаний температура 400 °С является той границей, выше которой водородное охрупчивание сплава ВТ9 принимает катастрофический характер, а защитные свойства естественной (из-под резца) окисной пленки не проявляются.

Результаты исследований микротвердости шлифов, а также микроструктуры галтелей образцов, подвергшихся минимальным деформационным воздействиям в процессе их растяжения как в водороде, так и в гелии, представлены на рис. 2 и 3.

Сплав после двойного отжига имеет смешанную глобулярно-пластинчатую структуру и микротвердость $HV_2 3800$ МПа (рис. 2, 3,е).

После кратковременных испытаний в среде водорода при 600 °С и двухчасовых испытаний при 500 °С зафиксированы изменения в структуре и микротвердости сплава. Максимальное увеличение микротвердости вплоть до регистрации микротрещин на микрошлифах произошло в интервале температур 400–500 °С, что указывает на верхнюю температурную границу возможного применения сплава в среде газообразного водорода под давлением 80 МПа в течение времени не более двух часов.

При увеличении до 2000 раз выделений гидридов титана не выявлено ни после кратковременных испытаний при 600 °С (зафиксировано падение микротвердости ниже исходного значения), ни после двухчасовой выдержки при 500 °С. Эти данные вполне согласуются с данными работы [6], в которой отмечается возможность образования когерентно связанных с матрицей гидридов титана, не выявляющихся при металлографическом анализе.

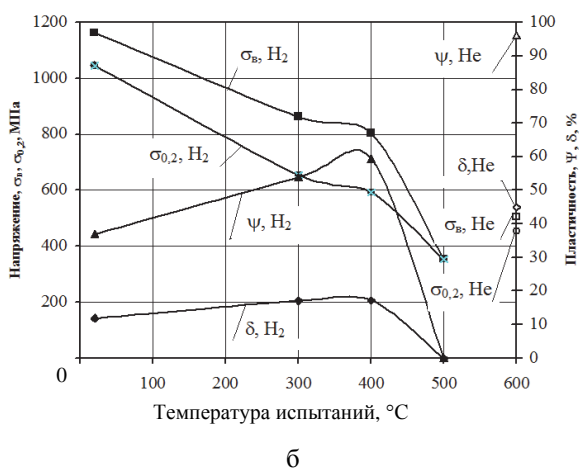
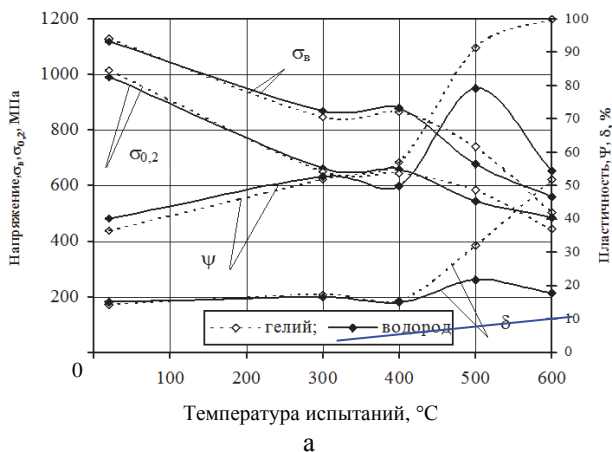


Рис. 1. Зависимость механических свойств сплава ВТ9 при растяжении в среде водорода и гелия при давлении 80 МПа от температуры после предварительной выдержки образцов под давлением среды при температуре испытания: а – в течение 5 минут; б – в течение 120 минут

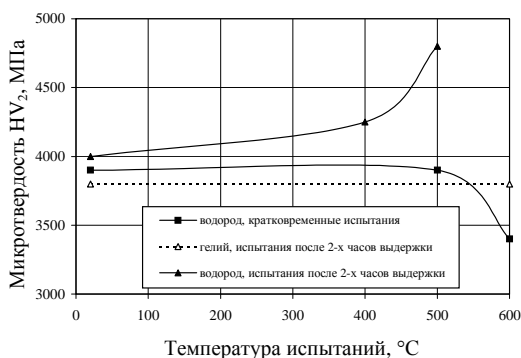


Рис. 2. Микротвердость сплава ВТ9 после испытаний при различных температурах в среде водорода и гелия

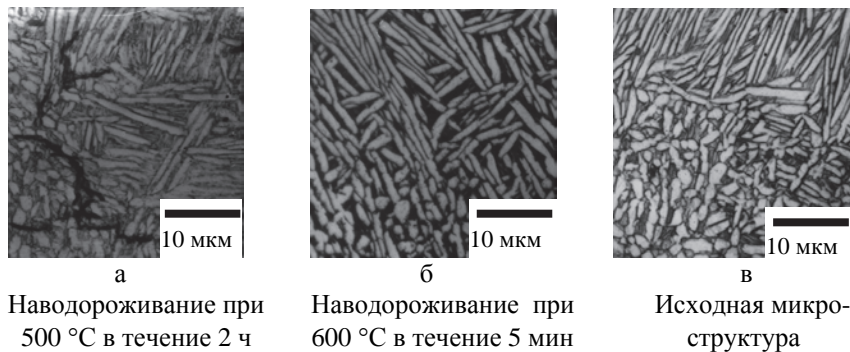


Рис. 3. Микроструктура сплава ВТ9 после испытаний образцов на растяжение

Известно [1], что титановые сплавы марок АТ-2, СТ-1, ВТ-1 и ОТ4 могут применяться для работы в среде водорода при давлении 10 МПа, если температура не превышает 300 °С, а длительность воздействия водорода – 30 минут. Выполненные исследования жаропрочного двухфазного титанового сплава ВТ9 позволяют существенно расширить известную температурно-временную область устойчивости титановых сплавов в среде газообразного водорода по времени его воздействия до 2 часов, по температуре эксплуатации до 400 °С, по уровню давления водорода до 80 МПа.

Заключение

Исследовано влияние воздействия газообразного водорода на механические свойства и структуру жаропрочного двухфазного титанового сплава ВТ9. Показано, что деградации свойств не наблюдается после выдержки сплава в течение 2 часов в среде газообразного водорода под давлением 80 МПа при температурах от 20 до 400 °С.

Список литературы

1. Сухотин А. М., Антоновская Э. И., Сгибнев Е. В., Корнилов И. И., Нартова Т. Т., Могутова Т. В. Исследования давления водорода на поведение титановых сплавов АТ-2 и СТ-1 при повышенных температурах // ЗМ. 1975, Т. XI, № 4. С. 458–459.
2. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Metallurgy, 1985.
3. Ливанов В. А., Буханова А. А., Колачев Б. А. Водород в титане. – Metallurgizdat, 1962.
4. Gutowsky H. S. // J. Electrochem. Soc. Vol. 66, N 8–9. P. 675–681.
5. Basunov A. V., Boitsov I. E. et al. Investigation into physical and mechanical properties of structural materials in gaseous media containing hydrogen isotopes // Proc. of the Microspheres – Microcapsules and Laser Targets Technology Specialists Workshop. 2–7 June 1997, Moscow.
6. Цвиккер У. Титан и его сплавы. – М.: Metallurgy, 1979.