ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 58, № 8 ФИЗИКА 2015

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 53.096.

Ю.Р. КОЛОБОВ,**, Е.Ф. ДУДАРЕВ***, Г.П. ПОЧИВАЛОВА***, В.И. ТОРГАНЧУК*,**, Е.В. ГОЛОСОВ*,**, Б.П. ТАРАСОВ***

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДНОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТИТАНА [1]

Ключевые слова: *наноструктурированный титан, водород, механические свойства.*

Разработка новых конструкционных и функциональных материалов с улучшенными свойствами представляет большой научный и практический интерес. В том числе это относится и к объемным субмикрокристаллических и наноструктурированным металлам и сплавам, получаемым воздействием пластической деформацией [1]. Такие материалы обладают уникальным комплексом физико-механических свойств, в частности высокой прочностью при сохранении или даже увеличении пластичности. Известно, что для титана и его сплавов при определенных концентрациях водорода характерна склонность к водородному охрупчиванию [2, 3]. Однако, несмотря на это, титановые сплавы широко используются, в том числе для работы в водородосодержащих средах, а также в условиях эксплуатации, приводящих к образованию водорода на поверхности металла [4–7].

Малая растворимость водорода в α-титановых сплавах приводит к выделению гидридной фазы преимущественно вдоль плоскостей скольжения и двойникования [8, 9]. Образование и распространение трещин вдоль выделившихся гидридов облегчается внутренними растягивающими напряжениями, которые возникают из-за большего удельного объема гидрида титана по сравнению с матрицей (α-титаном), а также из-за слабого их сцепления.

Гидриды в широком интервале концентраций водорода в титане слабо влияют на прочностные и пластические свойства при малых скоростях деформации. Однако с увеличением скорости деформации, а также при наличии концентраторов напряжений водородная хрупкость проявляется более заметно. Известно, что изменение пластических свойств напрямую зависит от формы и характера распределения гидридов. Так, например, при глобулярной форме гидридов удается заметно повысить пластичность и ударную вязкость, в то время как пластинчатые выделения гидридов создают большие концентраторы напряжений, и это приводит к снижению пластичности материала.

В связи с минимальной имеющейся информацией о влиянии водорода на механические свойства наноструктурированных металлов и сплавов в настоящей работе такое исследование проведено на примере наноструктурированного титана.

Для изучения влияния водорода на механические свойства наноструктурированного титана был выбран титан марки ВТ1-0 с суммарным содержанием примесей 0.283 вес. % (N – 0.003 %; C – 0.004 %; H – 0.0008 %; Fe – 0.12 %; O – 0.143 %; Al – 0.01 %; Si – 0.002 %). Наноструктурированное состояние было сформировано воздействием пластической деформацией при сочетании винтовой и продольной прокаток [10]. Детальная информация об особенностях микроструктуры и гистограммах распределения элементов зеренно-субзеренной структуры в исследуемом материале дана в [1]. Средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры для исследуемого состояния титана составляет $d \approx 200$ нм. Диффузионное насыщение водородом проводили по методу Сивертса на специализированной установке. Температурно-временной интервал насыщения водородом подбирали с учетом необходимости сохранения наностуктурированного состояния, поэтому отжиги проводили при температуре ниже температуры рекристаллизации (425 °C). Все работы по подготовке поверхности и загрузку в реактор-автоклав осуществляли в сухом боксе в атмосфере аргона. Нагрев до заданной температуры проводили совместно с откачкой газов из реактора-автоклава с последующей выдержкой в течение 30 мин после установления температуры. Для исследования использовали высокочистый металлогидридный источник водорода (> 99.9999 %).

Исследование механических свойств осуществляли на универсальных испытательных машинах INSTRON с использованием плоских и цилиндрических образцов. В качестве схемы испытаний на усталость была выбрана схема изгиба с вращением с использованием высокоскоростной машины модели Р.Р. Мура. Частота вращения составляла 50 Гц. Исследования были проведены на образцах с V-образным надрезом с радиусом $R = 0.3$ мм у основания. Измерение температурной зависимости внутреннего трения

[1]Работа поддержана Минобрнауки РФ в рамках базовой и конкурсной (проект № 3.1492.2014/K) частей госзадания вузам.

образцов после наводораживания проводили на обратном крутильном маятнике в интервале температур 25–700 °С при частоте колебаний примерно 1 Гц в процессе нагрева образца.

Обнаружено, что после отжига в атмосфере водорода не наблюдается резкого снижения пластичности и охрупчивания как при испытаниях на растяжение, так и на сжатие. Ранее авторами было установлено [11], что гидридная фаза в наноструктурированном титане наблюдается в виде тонкодисперсных выделений субмикронного размера, которые могут не оказывать отрицательного влияния на пластичность. Более того, в работах [12, 13] на примере циркониевого сплава (Zr 702) было обнаружено положительное влияние тонкодисперсной гидридной фазы на механические свойства указанного сплава.

Как следует из рис.1, *а*, у наноструктурированного титана, отожженного в водороде при температурах 325–425 ºС, при одноосном сжатии степень пластической деформации до разрушения значительно больше, чем при одноосном растяжении.

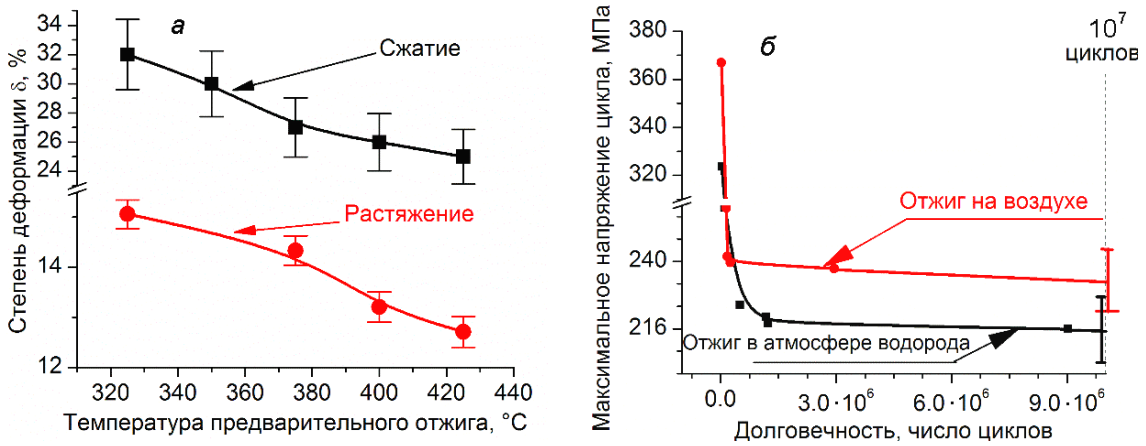

Рис. 1. Влияние водородной обработки на механические свойства наноструктурированного титана: *а* – квазистатические испытания; *б* – циклические испытания

Это может быть связано с тем, что при растяжении основным механизмом пластической деформации титана является скольжение, а при сжатии значительный вклад вносит двойникование [14]. В то же время при более низких температурах наводораживания практически весь водород находится в твердом растворе с незначительным выделением гидрида титана в приповерхностных слоях, что приводит к проявлению эффекта активизации призматической и пирамидальной систем скольжения и, как следствие, к увеличению пластичности. По мере увеличения концентрации водорода (с увеличением температуры предварительного отжига) часть водорода уходит на образование гидрида, в результате чего эффект пластификации от водорода, находящегося в твердом растворе, снижается и усиливается вклад в деформационные процессы эффектов, связанных с присутствием гидрида титана.

На рис. 1, *б* представлены результаты исследований влияния наводораживания (отжиг в атмосфере водорода при температуре 325 °С) образцов наноструктурированного титана на величину предела усталостной выносливости, которую для сравнения определяли также и на образцах, отожженных на воздухе при тех же температурах. По экспериментальным точкам проводилась кривая, для описания которой подбиралось уравнение с использованием метода наименьших квадратов, по которым определяли предел усталостной выносливости при 10^7 циклах (метод графической интерполяции, погрешность измерения по которому лежит в интервале 10–20 %). Из рис. 1, *б* видно, что наводораживание наноструктурированного титана приводит к уменьшению предела выносливости. Он становится меньше предела выносливости наноструктурированного титана, предварительно отожженного на воздухе.

Исследования температурной зависимости внутреннего трения крупнозернистого и наноструктурированного титана после наводораживания показали следующее. Как и без наводораживания, восходящая ветвь зернограничного пика внутреннего трения у наноструктурированного титана смещена в область более низких температур по сравнению с крупнозернистым аналогом (рис. 2).

Согласно [15], это свидетельствует о том, что при использованных температурах наводораживания энергия активации истинного зернограничного проскальзывания наноструктурированного титана осталась меньше, чем у крупнозернистого титана. Увеличение концентрации водорода в крупнозернистом титане при повышении температуры наводораживания с 325 до 350 ºС привело к смещению восходящей ветви зернограничного пика внутреннего трения в область пониженных температур, то есть при совершенной структуре границ зерен водород способствует развитию истинного зернограничного проскальзывания. Причем независимо от температуры и времени наводораживания в интервале температур 340–400 ºС наблюдается гидридный пик внутреннего трения.

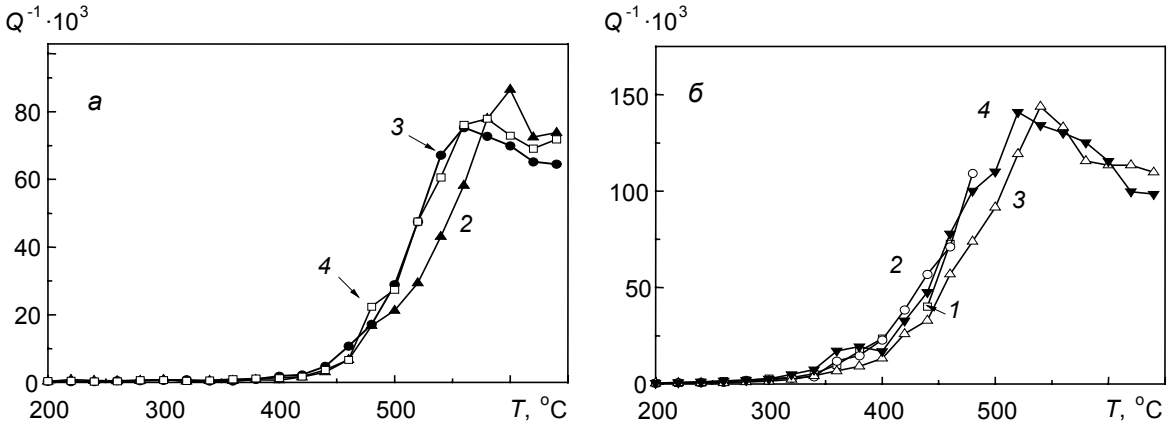

Рис. 2. Температурная зависимость внутреннего трения титана ВТ1-0 в крупнозернистом (*а*) и наноструктурированном (*б*) состоянии без (кр. *1*) и после водородной обработки при температурах 325 °С 2 ч (кр. *2*), 350 °С 2 ч (кр. *3*) и 350 °С 4 ч (кр. *4*)

Таким образом, диффузионное насыщение водородом наноструктурированного α-титана не приводит к обычно наблюдаемому у гидридообразующих металлов (в том числе и у нелегированного титана) резкому уменьшению пластичности при одноосном растяжении; усталостная прочность при этом понижается. Как и без наводораживания, у наноструктурированного титана после насыщения водородом температурный интервал истинного зернограничного проскальзывания смещен в область пониженных температур по сравнению с крупнозернистым наводороженным титаном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колобов Ю.Р. // Российские нанотехнологии. – 2009. – Т. 4. – № 11–12. – С. 69–81.
2. Цвиккер У. Титан и его сплавы. – М.: Металлургия, 1979. – 511 с.
3. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 216 с.
4. Yamamoto Y. and Shinohara K. // Anat. Rec. – 2002. – V. 69.– P. 17–23.
5. Rodrigues D.C., Urban R.M., Jacobs J.J., and Gilbert J.L. // J. Biomed. Mater. Res. B. – 2009. – V. 8. – No. 1. – P. 206–219.
6. Lütjering G. and Williams J.C. Titanium. – 2nd edition. – Berlin; New York: Springer, 2007. – 454 p.
7. Corrosion. Handbook 9th Ed. – M.: ASM Int., 1987. – V. 13.
8. Chen C.Q. et al. // Acta Mater. – 2004. – V. 52. – No. 12. – P. 3697–3706.
9. Conforto E. et al. // Philos. Mag. – 2004. – V. 84. – No. 7. – P. 631–645.
10. Иванов М.Б. и др. // Российские нанотехнологии. – 2011. – Т. 6. – № 5–6. – С. 72–78.
11. Торганчук В.И. // Сб. материалов Всерос. молодеж. науч. конф. с международным участием «Инновации в материаловедении». – М., 2013. – С. 337.
12. Louthan M.R. and Marshall R.P. // J. Nucl. Mater. – 1963. – V. 9. – No. 2. – P. 170–184.
13. Danielson P.E., Sutherlin R.C., and Chang W. // Materials Park, OH: ASM International. – 2004. – P. 942–958.
14. Черняева Т.П., Грицина В.М. // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 15–27.
15. Дударев Е.Ф., Почивалова Г.П., Колобов Ю.Р. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2004. – Т. 47. – № 6. – С. 39–46.

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет;
г. Белгород, Россия
E-mail: kolobov@bsu.edu.ru
**Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия
***Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Поступило в редакцию 10.12.14.

Колобов Юрий Романович, д.ф.-м.н., профессор;
Дударев Евгений Федорович, д.ф.-м.н., профессор;
Почивалова Галина Прокофьевна, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Торганчук Владимир Игоревич, аспирант;
Голосов Евгений Витальевич, к.ф.-м.н., руководитель инновационно-экспертного отдела;
Тарасов Борис Петрович, к.х.н., зав. лабораторией.