

05.1
©1995

ЭФФЕКТЫ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ПАМЯТИ ФОРМЫ В СИСТЕМЕ Zr-H

Л.В.Спивак, Н.Е.Скрябина

Необходимыми условиями для наблюдения синергических эффектов микропластичности, т. е. многократного, на порядок и более, ускорения деформации прямого и обратного механического последействия при наводороживании в высокоградиентном силовом поле металлов VIII группы периодической системы элементов (Fe и Pd) и металлов Va группы (V, Nb, Ta), а также сплавов на основе этих элементов, являются [1-5]: достаточно высокий коэффициент диффузии водорода в металле при 20°C, обычно порядка $10^{-9} - 10^{-10}$ м²/с, возникновение гидридных фаз или гидридоподобных комплексов (кластеров) по механизму диффузионно-кооперативного фазового перехода, достаточно широкая концентрационная область существования ($\alpha + \beta$) состояний на диаграммах состояния металл-водород. Сильными гидридообразующими элементами являются и металлы IVa группы — Ti, Zr, Hf. Это давало основание ожидать подобные же синергические эффекты при наводороживании в поле напряжений и металлов IVa группы, в частности Zr, имеющего много общего с ванадием или ниобием в строении и механизмах выделения гидридных фаз из насыщенного водородом твердого раствора [6-8].

Неоднородное деформационное поле создавали закручиванием проволочных, диаметром 1.0 и рабочей длиной 50 мм, образцов поликристаллического Zr (0.02% O₂, 0.001% H₂, 0.02N₂) в установке типа обратного крутильного маятника. Приложенный крутильный момент приводил к появлению на поверхности образца напряжения, которое при работе в режиме ползучести задавалось меньше макроскопического предела текучести τ_f . Введение водорода осуществляли электролитически из раствора 1N H₂SO₄ в воде +100 мг/л As₂O₃. Анод — две платиновые проволоки. Катод — образец. Плотность катодного тока i_c варьировалась в пределах 250–1000 А/м². В той же установке часть образцов циркония перед наводороживанием деформировалась пластически кручением, чтобы рассмотреть влияние наводороживания на деформацию обратного механического последействия. После наводороживания образцы термоциклировались в той же установке со скоростью 8–10° мин.

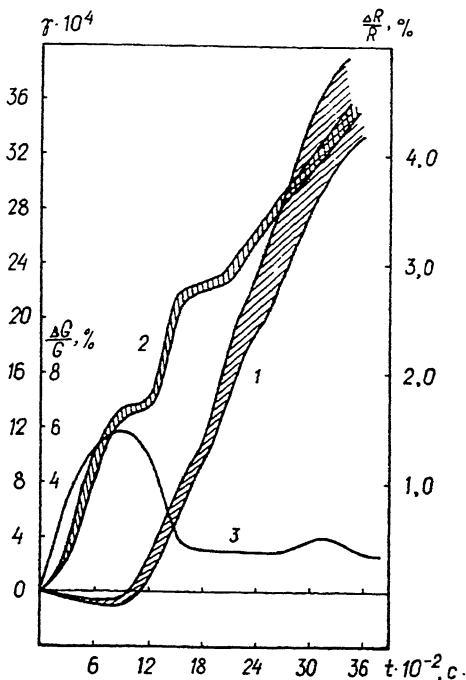


Рис. 1. Влияние продолжительности наводороживания циркония на деформацию ползучести при $\tau = 290$ МПа (1), изменение электросопротивления (2) и модуля сдвига (3). $i_c = 350$ А/м².

Происходящая при наводороживании и последующем термоциклировании деформация γ регистрировалась методом оптического рычага с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-6}$. Достоверность результатов обеспечивалась проведением идентичных измерений на трех и более образцах.

При нагружении образцов циркония ниже макроскопического предела текучести и последующем наводороживании обнаружена (см. рис. 1) существенная по величине и немонотонная по своему развитию деформация. Обращает на себя внимание появление на начальном этапе наводороживания отрицательной ползучести. Последнее при $\tau < \tau_f$ можно трактовать как следствие увеличения модуля сдвига (G) на начальных этапах наводороживания. Измерение по специальной (см. [2,4]) методике модуля сдвига и электросопротивления (R) непосредственно в процессе наводороживания (см. рис. 1), наряду с последующим рентгеноструктурным анализом образцов циркония, наводороживаемых в течение различного времени t , показывает, что первоначальному увеличению электросопротивления и моду-

ля сдвига и области отрицательных значений деформации ползучести отвечает увеличение концентрации водорода в α -фазе. Началу выделения гидридной фазы из α -твердого раствора водорода в цирконии соответствует замедление приращения электросопротивления и изменение знака производной $d\gamma/dt$ и dG/dt на кривой $\gamma(t)$ и $G(t)$.

Примечательно, что полученные при наводороживании циркония в режиме ползучести результаты достаточно хорошо коррелируют с полученными ранее в аналогичных условиях данными по ниобию [4]. Однако если на монокристаллах ниобия сам факт увеличения модуля C_{44} в твердых α -растворах водорода в металле был установлен достаточно давно [9], то для циркония, насколько нам известно, какие-либо данные о влиянии водорода на упругие константы α -фазы отсутствуют.

Таким образом, в этих экспериментах установлено, что наводороживание циркония в поле напряжений инициирует заметную по скорости и величине деформацию прямого механического последействия лишь при возникновении и развитии гидридного превращения — гидридного фазового перехода. Это позволяет считать обнаруженное ускорение деформации проявлением концентрационного, обусловленного только изотермическим изменением концентрации водорода, эффекта пластичности превращения [1-5]. Происходящая в этом случае деформация есть, по-видимому, некая интегральная величина микроскопических сдвигов, дисторсий, при росте в поле напряжений гидридных кристаллов по бейнитному механизму [2,6].

Одним из подтверждений организованного, согласованного со схемой нагружения, формирования и роста гидридных выделений при наводороживании в поле напряжений циркония может служить обнаружение в этой работе обратной по знаку деформации при нагреве наводороженных таким образом образцов (рис. 2, а). В данном случае мы имеем своеобразное проявление эффекта памяти формы (см. [1-4]). Наличие небольшой деформации при охлаждении свидетельствует о выделении части гидридной фазы в местах своего первоначального существования с сохранением имеющейся после наводороживания (до нагрева) ориентации гидридных выделений. Одна из причин уменьшения деформации при охлаждении может быть связана с выравниванием концентрационного профиля водорода по сечению образца за счет усиления диффузионных процессов при термоциклировании.

При наводороживании пластически деформированного циркония также обнаружено ускорение деформации обратного механического последействия (γ) и существование мно-

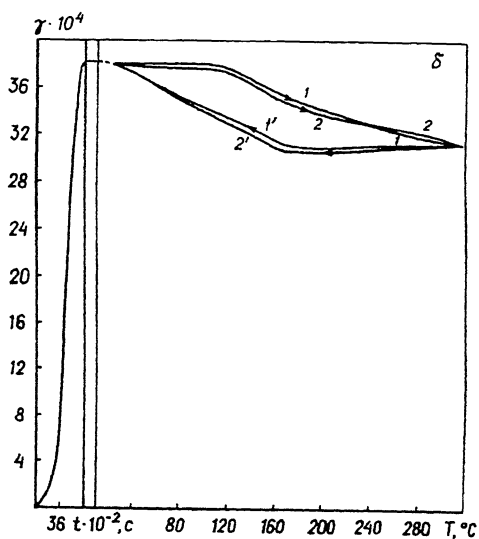
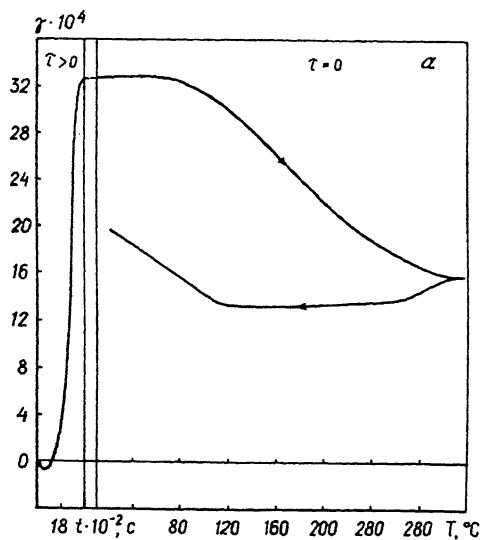


Рис. 2. Влияние наводороживания и последующего термоциклирования на деформацию циркония: а — наводороживание в режиме ползучести ($\tau = 290$ МПа), б — наводороживание в режиме обратного механического последействия ($\gamma_k = 0.67$), $i_c = 350$ А/м².

гократнообратимого эффекта памяти формы (рис. 2, б). Следовательно, как и во многих других гидридообразую-

щих металлах VIII и Va групп, наводороживание циркония в поле внешних или внутренних напряжений сопровождается развитием деформационных процессов, отсутствующих при нагружении без наводороживания или нагружения предварительно наводороженных образцов.

Таким образом, на одном из металлов IV группы обнаружен концентрационный эффект пластичности превращения, существование специфического по организации деформационного эффекта памяти формы и т. п. Более того, установлено, что в области существования α -фазы растворение водорода в цирконии сопровождается увеличением модуля сдвига.

Концентрационная область существования при 20°C α -фазы на диаграмме Zr-H близка к таковой для системы Pd-H. Одного и того же порядка оказались и времена наводороживания, необходимые для активизации деформации в поле напряжений. Это позволяет полагать, что реальный коэффициент диффузии водорода в α -Zr при 20°C много больше рассчитанного по данным высокотемпературных измерений [10].

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] Спивак Л.В., Кац М.Я., Скрябина Н.Е. // ФММ. 1991. В. 6. С. 142-150.
- [2] Спивак Л.В., Кац М.Я., Скрябина Н.Е. Водород и механическое последствие в металлах и сплавах. Пермь, 1993. 343 с.
- [3] Кац М.Я., Спивак Л.В., Скрябина Н.Е. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 1. С. 21-24.
- [4] Гельд П.В., Кац М.Я., Спивак Л.В. // ФММ. 1987. Т. 64. В. 2. С. 406-407.
- [5] Спивак Л.В., Кац М.Я. Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 1. С. 51-53.
- [6] Гольдшмидт Х.Д. // Сплавы внедрения. Т. 2. М., 1971. 464 с.
- [7] Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. М., 1985. 217 с.
- [8] Андриевский Р.А. Материаловедение гидридов. М., 1986. 127 с.
- [9] Magerl A., Berre B., Alefeld G. // Phys. Stat. Solidi (a). 1976. V. 36. N 1. P. 161-171.
- [10] Лариков Л.Н., Исачев В.И. Структура и свойства металлов и сплавов. Диффузия в металлах и сплавах. Киев, 1987. 510 с.

Пермский государственный
университет

Поступило в Редакцию
9 июня 1994 г.
В окончательной редакции
28 августа 1994 г.