

05.1;12

©1993

ИНИЦИИРУЕМАЯ ВВЕДЕНИЕМ ВОДОРОДА ДЕФОРМАЦИЯ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ

Л.В.Спивак, В.А.Хрник, Н.Е.Скрябина

Интерес к проблеме взаимодействия водорода с аморфными металлическими сплавами (АМС) обусловлен как спецификой строения таких материалов, так и физико-механическими последствиями такого взаимодействия [1-4]. Нетривиальные результаты, полученные при изучении деформационного отклика металлических кристаллических систем на совместное действие полей напряжения и наводороживания [5-12] делали естественным постановку подобных же экспериментов и на АМС.

Такого рода эксперименты были осуществлены на установке типа обратного крутильного маятника, позволяющей нагружать образцы растягивающей нагрузкой (точность регистрации относительной деформации $\sim 5 \cdot 10^{-4}$) и крутящим моментом (точность регистрации деформации кручением $\sim 5 \cdot 10^{-5}$). Наводороживание производили из кислого электролита (1н $H_2SO_4 + 100$ мг/л As_2O_3) при плотности катодного тока $i_k = 20 - 200$ А/м². Образцы АМС (ширина 2-4, длина 50 мм и толщина ~ 50 мкм) служили катодом. Анод — платиновая проволока. Подробности методики изложены в [8].

Исследование было проведено на следующих АМС: $Fe_{81}B_{14}Si_{15}$, $Fe_{52}Co_{20}Si_{15}B_{13}$, $Fe_5Co_{70}Si_{15}B_{10}$, $Fe_5Co_{58}Ni_{10}Si_{11}B_{16}$, $Co_{67}Fe_4Cr_7Si_8B_{14}$, 84КХСР, $Ni_{60}Nb_{40}Ti_5$, $Ni_{60}Nb_{40}$. В качестве примера ниже приведены данные по сплаву $Ni_{60}Nb_{40}$.

Общей закономерностью, проявляющейся у всех без исключения АМС, является активация деформации при одновременном действии растягивающей нагрузки (σ) и наводороживания. Максимально используемая в работе с этим АМС осевая нагрузка (145 МПа) на порядок меньше его предела упругости (σ_y). Вызываемая ею деформация является полностью обратимой. Выдержка АМС под этой нагрузкой в течение нескольких часов при 300 К не привела к дополнительной деформации. Введение водорода резко активизирует деформацию ползучести, развитие которой на определенном этапе наводороживания ограничивается разрушением АМС (см. рис. 1, а). Как правило, с увеличени-

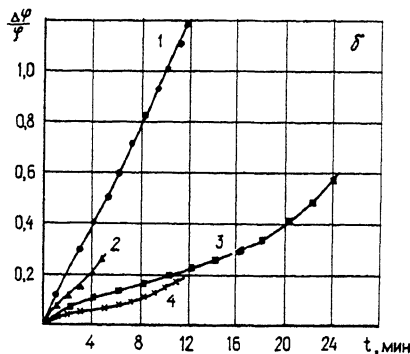
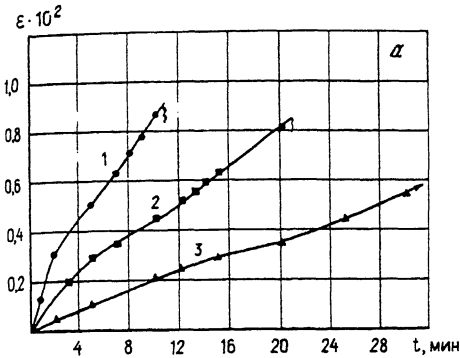


Рис. 1. Влияние продолжительности наводороживания на деформацию АМС Ni₆₀Nb₄₀.

a — при растяжении: 1 — $\sigma = 145$ МПа, $i_k = 100$ А/м²; 2 — $\sigma = 15.5$ МПа, $i_k = 100$ А/м²; 3 — $\sigma = 145$ МПа, $i_k = 20$ А/м².

b — при кручении: 1 — $M_k = 40 \cdot 10^{-6}$ кгм, $i_k = 100$ А/м²; 2 — $M_k = 120 \cdot 10^{-6}$ кгм, $i_k = 100$ А/м²; 3 — $M_k = 40 \cdot 10^{-6}$ кгм, $i_k = 20$ А/м²; 4 — $M_k = 120 \cdot 10^{-6}$ кгм, $i_k = 20$ А/м².

ем σ и i_k (интенсивности закачки водорода в АМС) время до разрушения имеет тенденцию к уменьшению. Величина деформации до разрушения изменяется менее однозначно. Таким образом, на широкой гамме АМС при нагрузках, значительно меньших предела упругости, обнаружена инициированная водородом ползучесть. Существенно, что обнаруженная деформация развивается только при активной закачке водорода в АМС. Прекращение подачи водорода ($i_k = 0$) тотчас останавливает развитие деформации. Обнаруженное явление, таким образом, наблюдается только при совместном действии двух факторов: поля напряжения и диффузионного потока водорода.

Тривиальным объяснением рассматриваемого эффекта могло быть предположение о том, что регистрируемая деформация есть ни что иное, как дилатация, увеличение объема АМС, при растворении в нем водорода. При справедливости данного предположения при $\sigma < 0.1\sigma_y$ скорость приращения удлинения не должна была бы зависеть от величины σ , а определяться только интенсивностью наводороживания, пропорциональной i_k . Этого в эксперименте не наблюдается (см. рис. 1, *a*). При $\sigma \rightarrow 0$ относительное удлинение (ε) также стремится к весьма малой величине порядка 0.05–0.1%.

Согласно [13], растворимость водорода в металле пропорциональна $\sqrt{i_k}$. При прочих равных условиях, в случае

наводороживания с $i_k = 100 \text{ А/м}^2$ в металл вводится 2.2 раза больше водорода, чем при наводороживании с $i_k = 20 \text{ А/м}^2$. Если считать, что деформация имеет чисто дилатационный характер, то и деформации при таких режимах наводороживания должны соответственно относиться друг к другу. В действительности же, например, для $\sigma = 145 \text{ МПа}$, $t = 10 \text{ мин}$ это соотношение равно ~ 4.5 .

Схемой нагружения, исключаяющей вклад дилатации в деформацию, совпадающей по направлению действующей силы, является кручение. Деформация при кручении прямоугольного тонкого сечения дается выражением [14]:

$$\varphi = \text{const} \frac{M_k l}{G a b^3},$$

где φ — угол закручивания, M_k — крутящий момент, l — длина образца, a и b — соответственно ширина и толщина полоски. Отсюда видно, что при допущении изотропности дилатации ($\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{b}$), обусловленное этим эффектом приращение деформации при постоянном M_k будет равно

$$\frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta a}{a} - 3 \frac{\Delta b}{b} - \frac{\Delta G}{G} = -\frac{3 \Delta l}{l} - \frac{\Delta G}{G}.$$

То есть при влиянии водорода только на геометрические параметры образца вызванная этим явлением деформация противоположна по направлению действующего на образец крутящего момента.

Результат соответствующих экспериментов (рис. 1, б) не только указывает на активизацию деформации при наводороживании, но и полностью в качественном плане коррелирует с данными по растяжению АМС. Соотношение деформации при фиксированном времени наводороживания и плотности катодного тока 100 и 20 А/м^2 для $M_k = 40 \cdot 10^{-6} \text{ кгм}$ равно ~ 4 , для $M_k = 120 \cdot 10^{-6} \text{ кгм}$ также около 4, что близко к соответствующим данным при растяжении. С уменьшением крутящего момента ниже некоторого предела, когда $M_k \rightarrow 0$, инициируемая введением водорода деформация также уменьшается.

Еще одним фактором, способным оказать влияние на ускорение деформации при одновременном воздействии напряжения и наводороживания, может быть изменение водородом упругих констант АМС.

Для анализа этой ситуации были проведены эксперименты с попеременным включением (наводороживание) и отключением тока поляризации с синхронной разгрузкой образца и соответствующей нагрузкой перед следующим

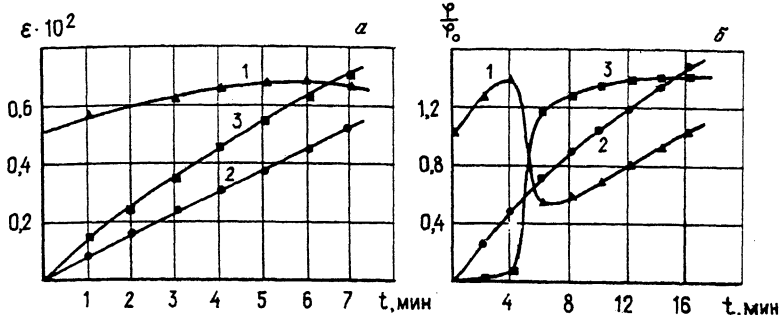


Рис. 2. Влияние продолжительности наводороживания под нагрузкой и разгрузки на деформацию АМС Ni₆₀Nb₄₀.

a — при растяжении ($\sigma = 145$ МПа, продолжительность цикла 1 мин) на остаточную деформацию ($\epsilon_{ост}$), обратимую деформацию ($\epsilon_{обр}$) и деформацию при наводороживании (ϵ_n). 1 — $\epsilon_{обр}$; 2 — $\epsilon_{ост}$; 3 — ϵ_n . $i_k = 100$ А/м².
b — при кручении ($M_k = 40 \cdot 10^{-6}$ кгм, продолжительность цикла — 2 мин) на остаточную деформацию ($\gamma_{ост}$), обратимую деформацию ($\gamma_{обр}$) и деформацию при наводороживании (γ_n). 1 — $\gamma_{обр}$, 2 — γ_n , 3 — $\gamma_{ост}$, $i_k = 100$ А/м².

циклом наводороживания. По мере увеличения числа циклов нагрузка — наводороживание — отключение тока — разгрузка фиксируется увеличение остаточной деформации ($\epsilon_{ост}$), приращение деформации непосредственно при наводороживании (ϵ_n) и обратимой ($\epsilon_{обр}$), или упругой, деформации (см. рис. 2, *a*). Увеличение $\epsilon_{обр}$ при постоянном σ можно интерпретировать как уменьшение эффективного модуля упругости при растяжении.

Совершенно аналогичная картина наблюдается при такого же рода циклировании в процессе нагружения при кручении АМС (см. рис. 2, *b*). Здесь, правда, отмечается более сложный характер изменения обратимой деформации ($\gamma_{обр}$) при наводороживании. В начале наводороживания упругие свойства снижаются, затем резко возрастают, и в дальнейшем стремятся к исходным перед наводороживанием значениям. Тем не менее и при этой схеме нагружения деформации при наводороживании (γ_n) складывается из приращения остаточной деформации ($\gamma_{ост}$) и приращения деформации за счет изменений упругих констант АМС. Определяющий вклад в суммарную деформацию дает необратимая ее часть. Наблюдаемое качественное подобие при рассмотрении деформационного поведения АМС при наводороживании деформированных растяжением и кручением образцов позволяют считать, наряду с другими отмеченными выше фактами, что дилатационные компоненты деформации в нашем случае не играют определяющей роли.

Таким образом, совместное действие полей напряжения и наводороживания инициирует заметную деформацию АМС различного класса. Микромеханизмы такой деформации скорее всего связаны с особенностями деформации АМС при релаксации полей внутренних и внешних напряжений. Высокая скорость такой релаксации объясняет то обстоятельство, что деформация АМС прекращается тотчас же после отключения тока поляризации.

Список литературы

- [1] *Maeland A.J.* // Rapidly Quenched Metals. Proc. 5. Int. Conf. Wuerzburg, Sept. 3-7. 1984. P. 1507-1514.
- [2] *Kim Y.-T., Stevenson D.A.* // J. Non-Cryst. Solids. 1988. V. 101. N 2-3. P. 187-197.
- [3] *Lin J.J., Pyng P.T.* // Acta met. et mater. 1991. V. 39. N 6. P. 1101-1109.
- [4] *Mizubayashi H., Naruze T., Okida S.* // J. Less-Common Metals. 1991. V. 172-174. Pt. B. P. 908-914.
- [5] *Гельд П.В., Кац М.Я., Спивак Л.В.* // ДАН СССР. 1986. Т. 267. В. 1. С. 106-108.
- [6] *Кац М.Я., Скрябина Н.Е., Спивак Л.В.* // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 1. С. 21-24.
- [7] *Кац М.Я., Спивак Л.В.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 23. С. 2168-2170.
- [8] *Спивак Л.В., Скрябина Н.Е.* // Изв. АН СССР. Металлы. 1988. В. 3. С. 147-151.
- [9] *Спивак Л.В., Скрябина Н.Е., Курмаева Л.Д., Смирнов Л.В.* // ФММ. 1988. Т. 66. В. 6. С. 1177-1183.
- [10] *Кац М.Я., Спивак Л.В.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 2. С. 196-198.
- [11] *Кац М.Я., Спивак Л.В.* // Письма в ЖТФ. Т. 16. В. 1. С. 51-53.
- [12] *Спивак Л.В., Кац М.Я., Скрябина Н.Е.* // ФММ. 1991. В. 6. С. 142-150.
- [13] *Закрочимски Т.* // Защита металлов. 1983. Т. 19. В. 5. С. 733-739.
- [14] *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* // Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.

Пермский государственный
университет
им.А.М.Горького

Поступило в Редакцию
8 июля 1993 г.