

ЛИТЕРАТУРА

1. *Cea J., Malanowski K.* An example of a max-min problem in partial differential equations // *SIAM J. Control*. 1970. V. 8. No. 3. P. 305–316.
2. *Klosowicz B.* Sur la nonhomogeneite optimale d'une barre torque // *Bul. Acad. Polon. Sci. Ser. Sci. Tech.* 1970. V. 18. No. 8. P. 611–615.
3. *Klosowicz B., Lurie K. A.* On the optimal non-homogeneity of a torsional/elastic bar // *Arch. Mech. Stosow.* 1971. V. 24. No. 2. P. 239–249.
4. *Баннчук Н. В.* Об одной двумерной задаче оптимизации в теории кручения упругих стержней // *Изв. АН СССР. МТТ*. 1976. № 5. С. 45–52.
5. *Лавров Н. А., Лурье К. А., Черкаев А. В.* Неоднородный стержень экстремальной жесткости кручения // *Изв. АН СССР. МТТ*. 1980. № 6. С. 86–92.
6. *Баннчук Н. В.* Оптимизация форм упругих тел. М.: Наука. 1980. 255 с.
7. *Lurie K. A., Cherkaev A. V., Fedorov A. V.* Regularization of optimal design problems for bars and plates I, II // *J. Optimiz. Theory and Appl.* 1982. V. 37. No. 4. P. 499–543.
8. *Экланд И., Темам Р.* Выпуклый анализ и вариационные проблемы. М.: Мир. 1979. 399 с.
9. *Kohn R., Strang G.* Optimal design and relaxation of variational problems I, II, III // *Commun. Pure and Appl. Math.* 1986. V. 39. No. 1. P. 113–137; No. 2. P. 139–182; No. 3. P. 353–357.
10. *Рокафеллар Р.* Выпуклый анализ. М.: Мир. 1973. 469 с.
11. *Kohn R. V., Strang G.* Optimal design for torsional rigidity // *Hybrid and Mixed Finite Element Methods*. N. Y.: Wiley. 1983. P. 281–288.
12. *Соколовский В. В.* Теория пластичности. М., Л.: Гостехиздат. 1950. 396 с.
13. *Хилл Р.* Математическая теория пластичности. М.: Гостехиздат. 1956. 407 с.
14. *Черноусько Ф. Л., Баннчук Н. В.* Вариационные задачи механики и управления. М.: Наука. 1973. 238 с.

Ленинград

Поступила в редакцию
28.XI.1986

УДК 539.3

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ АМОРФНЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ТИТАНА, ЖЕЛЕЗА И КОБАЛЬТА

ЗУЕВ Б. К., МИХАЙЛОВА Г. В., НОВИКОВ Н. П., СЕВАСТЬЯНОВ В. С.

Аморфные сплавы (АС) или так называемые металлические стекла обладают уникальными физическими свойствами [1–3]: они рассматриваются, как перспективные материалы для хранения водорода, так как проявляют пониженную водородную хрупкость по сравнению с кристаллическими сплавами [4, 5]. В настоящее время нет четкого представления о механизме разрушения АС. В публикуемой работе представлены результаты исследования процессов, происходящих при разрушении аморфных сплавов.

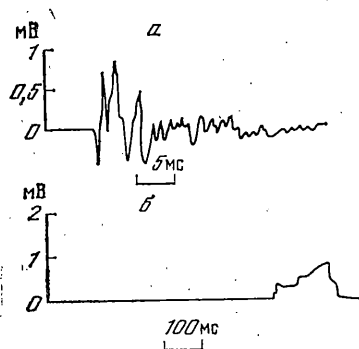
Образцы на основе титана разрушались растягивающей нагрузкой, а на основе железа и кобальта — путем продольного сдвига. Во всех образцах вдоль кромки разрушения образовывались множественные полосы сдвига, идущие под углом 45° к краю разрушения или параллельно ему. Полосы сдвига занимали область до 200 мкм от края разрушения и образовывали отдельные чередующиеся участки вдоль кромки разрыва.

При растяжении АС испытывают сильную локализованную деформацию сдвига. У кромки разрушения возникает серия полос сдвига, а на поверхности разрушения появляется характерный «венообразный» узор [1, 2, 6]. Присутствие водорода в АС может оказывать существенное влияние на процессы разрушения.

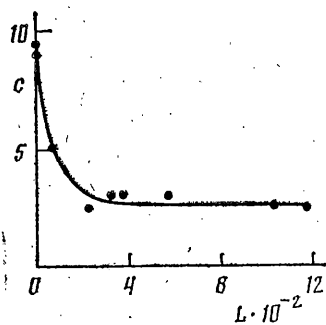
В экспериментах использовали аморфную ленту шириной 10 мм и толщиной от 30 до 70 мкм, изготовленную на основе титана, железа и кобальта [7]. Вблизи края разрушения измерялась микротвердость образцов, электромагнитные сигналы (ЭМС) (прибор описан в [8]), проводились электронно-микроскопические исследования, определялось распределение концентрации водорода по методике [9].

Измерения микротвердости АС на основе титана показали, что она изменяется от 560 до 1100 кг/мм², что можно объяснить высоким уровнем поверхностных напряжений. В частности, о наличии высоких поверхностных напряжений в аморфной ленте косвенно указывало образование длинной узкой трещины около отпечатка индентора микротвердомера, длина которой могла превышать диаметр отпечатка (16 мкм) в ~8 раз. Эта трещина начиналась у основания отпечатка и постепенно выходила на поверхность образца. Такие трещины наблюдались в основном в зоне локализованной деформации сдвига, но имели направление, не совпадающее с направлением расположения полос сдвига.

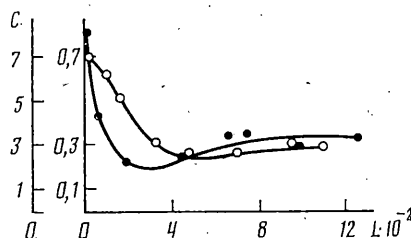
При разрушении образцов регистрировался ЭМС и сравнивался с сигналом от поликристаллического титана марки ВТ-1-0. Из фиг. 1 (а — титан, б — АС) видно, что



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

амплитуды у них практически одинаковые, а по длительности они отличаются в ~ 20 раз. Большая длительность сигналов от АС может быть объяснена скоростью движения разрушающей трещины.

Процесс разрушения связан с образованием зоны локализованной пластической деформации. Полосы сдвига у кромки разрушения в АС представляют собой ступеньки, величина которых определялась по микроинтерферограммам и составляет ~ 1 мкм. Для изучения структуры полос АС образцы подвергались програвливанию. Наблюдалось сильное расгравливание полос сдвига, что говорит о более рыхлой структуре материала. Изучение програвленных полос с обеих сторон аморфной ленты показало, что большинство полос сдвига распространяется на всю толщину ленты. Поскольку структура полос является более рыхлой, было сделано предположение, что в этих полосах может скапливаться водород, который облегчает движение фронта скольжения.

Для изучения поведения водорода в зоне разрушения АС применялся лазерный масс-спектрометрический метод, основанный на локальном отборе микропробы путем воздействия сфокусированного лазерного излучения на вещество: локальность метода изменялась от 30 до 200 мкм и разрушение по глубине от 0,2 до 30 мкм. В опытах использовалась минимальная локальность (30 мкм). Результаты анализа показали, что в области около кромки разрыва наблюдается превышение концентрации водорода по сравнению с исходной для пленок на основе титана, железа и кобальта. Зоны с повышенной концентрацией водорода у края разрушения для всех образцов имеют размер 130–120 мкм. Однако есть и такие места, где повышение концентрации водорода происходит только непосредственно на самом краю разрушения. Наибольшая концентрация водорода наблюдается непосредственно у края разрушения и превышает исходный уровень в 3–5 раз для всех АС. Типичная кривая распределения концентрации водорода вблизи зоны разрушения приведена на фиг. 2 (концентрация c — в отн. ед., расстояние — в мкм; глубина проведения анализа $\sim 0,25$ мкм). По-видимому, тонкий поверхностный слой АС у края разрыва насыщается водородом при разрушении на воздухе и локального разогрева. Можно предположить, что кривая распределения водорода у края разрушения соответствует распределению остаточных напряжений. Неоднородность распределения водорода наблюдалась и в случае отсутствия множественных полос сдвига. Из [10, 11] известно, что влажность воздуха является основной причиной насыщения металлов водородом и ухудшения их механических свойств.

В следующей серии экспериментов исследовали насыщение металла водородом при пластической деформации без его разрушения. С этой целью лента АС на основе железа изгибалась на воздухе до момента образования полосы изгиба и затем разгибалась до получения ровной поверхности. Толщина полосы изгиба равнялась ~ 40 мкм. Определялась концентрация водорода на поверхности ленты, которая подвергалась растяжению при изгибе. На фиг. 3 представлены зависимости объемной (светлые, левая шкала) и поверхностной (темные, правая шкала) концентраций (отн. ед.) от глубины (мкм). В полосе изгиба концентрация водорода в 2–3 раза выше исходной, как для «поверхностного» анализа (глубина $\sim 0,25$ мкм), так и при пробивании ленты насквозь лазерным лучом (толщина ~ 30 мкм). Концентрация водорода понижается при удалении от полосы изгиба и на расстоянии 200–300 мкм достигает небольшого минимума, отличающегося от исходной концентрации в

1,2–1,5 раза. Можно предположить, что изменение концентрации водорода обусловлено двумя процессами: перераспределением водорода, находящегося внутри металла, и поступлением его из атмосферы. Первый обуславливает перенос водорода в зону пластической деформации из областей, прилегающих к полосе изгиба. Эти области лежат по обе стороны от полосы изгиба на расстояниях 400–600 мкм (фиг. 3). Поскольку в АС, как предполагается в [2], существует свободный объем особого вида (рассматриваемый как малый сегмент дислокационного ядра), то процесс деформирования и сдвига АС может происходить за счет его перераспределения. Водород накапливается в свободном объеме и перемещается вместе с ним в зону изгиба. В результате движения свободного объема вместе с водородом вблизи полосы изгиба могут образовываться полосы сдвига. Действительно, на расстоянии 250–350 мкм наблюдаются серии таких полос. Второй механизм накопления водорода связан с наличием паров воды в воздухе. Этот механизм является преобладающим. Водород, образованный в результате диссоциации воды, проникает на всю толщину фольги в процессе сильной пластической деформации, что было показано путем послойного травливания образца лазерным лучом.

Процесс разрушения аморфной ленты на основе титана сопровождался яркими вспышками в воздухе и атмосфере аргона. Яркую вспышку можно объяснить пробоем в поле ювенильных поверхностей [12]. Оценим условия пробоя и время релаксации зарядов. Рассмотрим лавинную ионизацию и используем обозначения [13]. Для частоты ионизации (ν_i) оценки дают $\nu_i \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ($E=10^7 \text{ В/см}$ [12]). Отсюда время нарастания лавины $\theta^{-1} = \nu_i(E) - \nu_d$ (ν_d – частота диффузионного ухода, $\nu_i > \nu_d$). Время релаксации (t_1) полагаем равным времени пробоя t_2 : $t_1 = t_2 = \theta \ln(N_1/N_0) \approx 3 \cdot 10^{-12} \text{ с}$ ($N_1=10^{13}$, $N_0=1$). Для меди $t_1 \approx 10^{-14} \text{ с}$ [14]. Максимальная энергия электрона много больше потенциала ионизации азота и кислорода. Пробой возможен и инициируется движущейся разрушающей трещиной. Не исключается также, что процесс разрушения может сопровождаться выбросом разогретых микрочастиц или кластеров в результате релаксации высоких внутренних напряжений.

Таким образом, в АС на основе титана при разрушении растяжением может происходить разогрев кромок АС, сопровождающийся свечением в области разрушения и генерацией электромагнитного сигнала. Лазерный масс-спектрометрический метод показал, что в зоне 130–200 мкм от края разрушения наблюдается повышение концентрации водорода (в 3–5 раз) от исходной до максимальной (у самого края) для всех исследуемых АС. Это позволило оценить зону влияния разрушения. В полосе изгиба АС на основе железа наблюдалось повышение концентрации водорода в 2–3 раза по сравнению с исходной. Такое накопление водорода в АС может привести к ухудшению его механических свойств, поскольку водород способствует охрупчиванию металлов. Детальные исследования этих закономерностей помогут разобраться в вопросе о процессах, происходящих при деформации и разрушении АС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бек Г., Блэк Дж., Коут П. и др. Металлические стекла; ионная структура, электронный перенос и кристаллизация. М.: Мир, 1983. 376 с.
2. Полк Д. Е., Гиссен Б. К., Кавеш Ш. и др. Металлические стекла. М.: Металлургия, 1984. 264 с.
3. Naka M., Hashimoto K., Masumoto T. High corrosion resistance of chromium-bearing amorphous iron alloys in neutral and acidic solution containing chloride // Corrosion. 1976. V. 32. N 4. P. 146–152.
4. Lin R.-W., Johnson H. H. Hydrogen permeation in the metallic glass $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ // J. Non-Crystalline Solids. 1982. V. 51. N 1. P. 45–56.
5. Libowitz G. C., Macland A. J. Interactions of hydrogen with metallic glass alloys // J. Less-Common Metals. 1984. V. 101. P. 131–143.
6. Amorphous Metallic Alloys/Ed. F. E. Luborsky. L.: Butterworth. 1983. 534 p.
7. Будберг П. В., Алисова С. А., Ковнеристый Ю. К., Молоканов В. В. Фазовые превращения в системе // Докл. АН СССР (ДАН СССР). 1981. Т. 259. № 1. С. 142–146.
8. Бивин Ю. К., Викторов В. В., Кулинич Ю. В., Чурсин А. С. Электромагнитное излучение при динамическом деформировании различных материалов // Изв. АН СССР. МТГ. 1982. № 1. С. 183–186.
9. Зуев В. К., Касацкий Г. Н., Кулаков Ю. А., Кунин Л. Л., Михайлова Г. В. Исследования распределения водорода в области неметаллических включений в стали лазерным масс-спектрометрическим методом // Ж. аналит. химии. 1979. Т. 34. № 9. С. 1714–1719.
10. Chen H. S. Stored Energy in a cold-rolled metallic glass // Appl. Phys. Letters. 1976. V. 29. N 6. P. 328–330.
11. Поляков А. А., Гаркунов Д. Н., Симаков Ю. С. и др. Защита от водородного износа в узлах трения. М.: Машиностроение, 1980. 135 с.
12. Дерягин Б. В., Кротова Н. А., Карасев В. В. Свойство свежобразованных поверхностей твердых тел испускать в вакууме электроны высоких энергий // Вестн. АН СССР. 1985. № 2. С. 142.
13. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980. 415 с.
14. Молоцкий М. И. Дислокационный механизм люминесценции металлов при разрушении // ФТТ: 1978. Т. 20. Вып. 6. С. 1651–1658.

Москва

Поступила в редакцию
15.VII.1986