

УДК 539.2

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН ПРИ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИИ ОТОЖЖЕННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБЛАСТИ

© И.В. Ушаков, И.Е. Пермякова, В.А. Федоров, Н.А. Зенякова, О.А. Потапова

Ushakov I.V., Permyakova I.E., Fedorov V.A., Zenyakova N.A., Potapova O.A. The investigation of crack formation regularities of annealed metallic glass in a high-temperature area under micro-indentation. The regularities of crack formation of metallic glass 82K3XCP annealed at high temperatures after micro-indentation on different substrates were investigated. The linear dependencies of crack formation probability on the indenter load were established. It was shown that the application of elastic substrate is preferable under the determination of mechanical characteristics of metallic glass.

Одним из негативных моментов в применении металлических стекол (МС) является их склонность к охрупчиванию после термической обработки [1–3]. Таким образом, получение информации по этому вопросу имеет практический интерес.

Ранее установлено, что микроиндентирование МС, отожженного при температуре выше некоторой критической (температура вязко-хрупкого перехода) и зависящей от материала подложки, сопровождается образованием трещин. Зависимость вероятности их образования от нагрузки на индентор является линейной вплоть до температур начала кристаллизации МС. В то же время зависимость от температуры уменьшающейся величины нагрузки, необходимой для образования трещин, является экспоненциальной. Максимальное охрупчивание МС достигается при переходе сплава в кристаллическое состояние [4].

Цель работы заключается в исследовании закономерностей образования трещин при индентировании на различных подложках МС, подвергнутых предварительному отжигу в температурном интервале от начала процесса кристаллизации вплоть до предплавиельных температур.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на металлическом стекле 82K3XCP. Толщина ленты 30 мкм, состав: 83,7 % Со + 3,7 % Fe + 3,2 % Cr + 9,4 % Si (вес. %). Перед испытанием образцы (10×20 мм) отжигали в печи при  $T_{an} = 928–1053$  К с выдержкой 10 мин при каждой температуре. Характер деформации и разрушения исследовали на микротвердомере ПМТ-3 при индентировании МС на подложке с различной микротвердостью (подложка № 1 – полиэфирный композит ТУ 2312-021-11748532-97, микротвердость  $\approx 151$  кГ/мм<sup>2</sup>, подложка № 2 – клей на основе натурального каучука ГОСТ 2199-78, марка «А», микротвердость  $< 10$  кГ/мм<sup>2</sup>.) В свою очередь, подложки толщиной  $\approx 1$  мм наносили на металлическую основу.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что вероятность появления трещин при индентировании прямо пропорциональна нагрузке на индентор для исследуемого температурного интервала (рис. 1). На графиках каждой экспериментальной точке соответствуют 20 опытов. Полученные зависимости аппроксимировали в линейном приближении выражением вида  $W = aP + b$ .

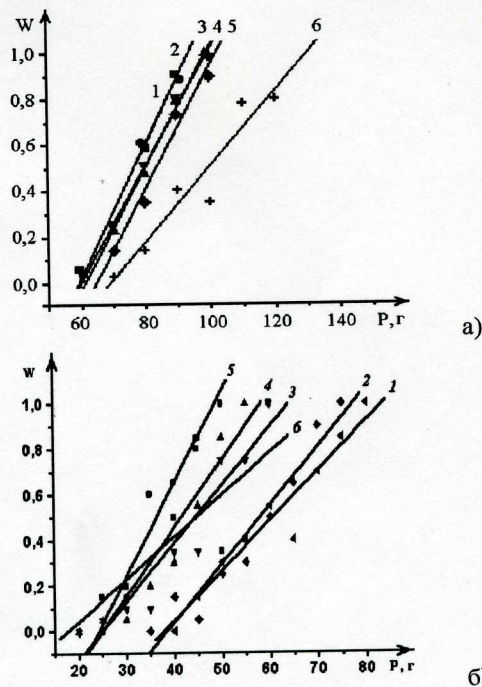


Рис. 1 Зависимость вероятности ( $W$ ) образования трещин при индентировании МС на подложках от нагрузки на индентор ( $P$ , г) для различных температур отжига: 1 –  $T_{an} = 928$  К, 2 –  $T_{an} = 973$  К, 3 –  $T_{an} = 998$  К, 4 –  $T_{an} = 1008$  К, 5 –  $T_{an} = 1023$  К, 6 –  $T_{an} = 1053$  К. а) – подложка № 1, б) – подложка № 2

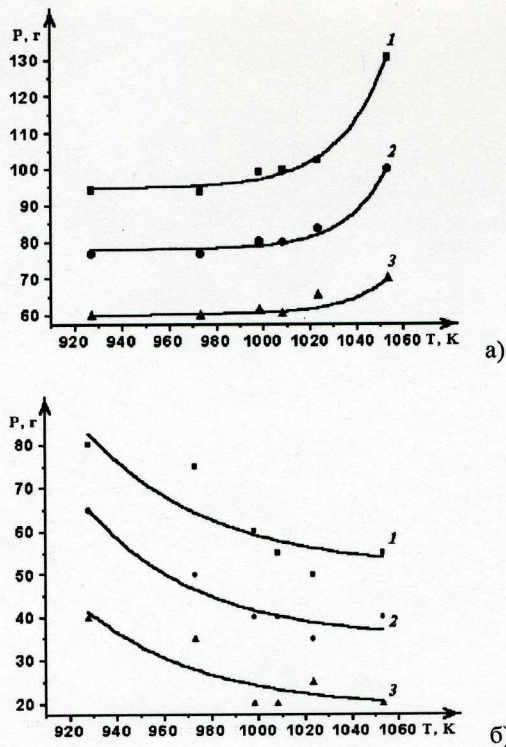


Рис. 2. Зависимость величины нагрузки ( $P$ , г) при индентировании МС на подложке № 1 (а) и на подложке № 2 (б) от температуры отжига, для вероятности образования трещин:  $W = 1 - 1$ ,  $W = 0,5 - 2$ ,  $W = 0 - 3$ . Зависимость 3 построена для максимальной нагрузки на индентор, при которой еще не возникают трещины

Линейный характер зависимостей сохраняется для всех образцов. Все зависимости имеют высокие значения коэффициентов корреляции  $R$ . Для подложки № 1 они находятся в диапазоне 0,959–0,997, для подложки № 2 – 0,801–0,976.

По мере повышения температуры отжига свыше 973 К на подложке № 1 отмечено увеличение, а на подложке № 2 уменьшение величины нагрузки на индентор, необходимой для образования трещин при микроиндентировании МС, которое можно описать экспоненциальными зависимостями  $P_1 = P_0 + A \exp(T/C)$  и  $P_2 = P_0 + A \exp(-T/C)$ , соответственно (рис. 2), где  $P_0$  – минимальная величина нагрузки, при которой начинают зарождаться трещины;  $A$ ,  $C$  – коэффициенты, имеющие размерность нагрузки и температуры соответственно.

Для подтверждения того, что полученные зависимости действительно экспоненциальные, проведена перестройка экспериментальных данных в спрямляющих координатах, в которых они характеризуются линейной зависимостью (рис. 3). Коэффициенты линейной корреляции лежат в диапазоне  $R = 0,8 - 0,9$ .

Отличие, заключающееся в том, что на подложке № 1 наблюдается экспоненциальный рост нагрузки при повышении температуры отжига, а на подложке № 2 – экспоненциальный ее спад при повышении  $T_{ан}$ , объясняется следующим образом. Сопоставление результатов исследования пластичности, хрупкости независимым  $U$ -методом [5] и полученных при микроиндентировании на эластичных подложках показало

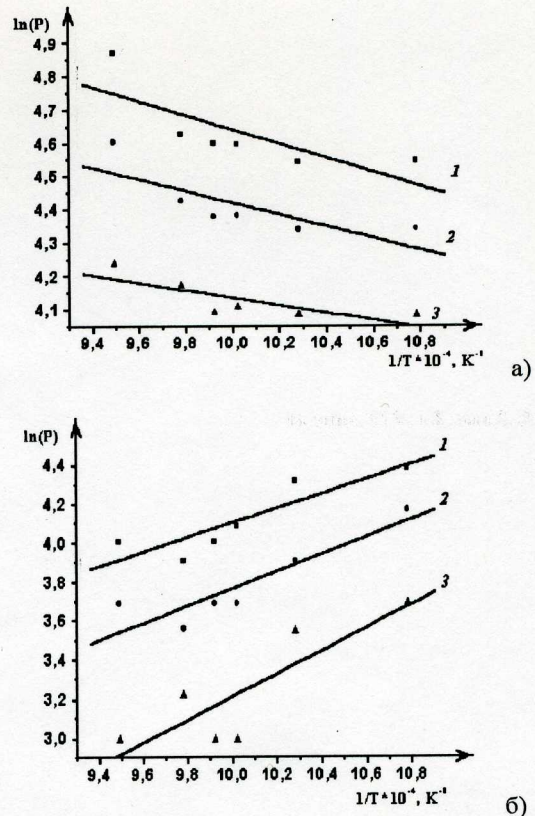


Рис. 3. Зависимость величины нагрузки ( $P$ , г) при индентировании МС на подложке № 1 (а) и подложке № 2 (б) от температуры отжига в спрямляющих координатах, для вероятности образования трещин:  $W = 1 - 1$ ,  $W = 0,5 - 2$ ,  $W = 0 - 3$

их адекватность. Из этого следует, что данные, полученные на подложке № 2, наиболее достоверно описывают кинетику процесса охрупчивания МС: с ростом температуры отжига требуются все меньшие нагрузки для образования трещин. Противоположные по значению результаты на подложке № 1 (жесткая подложка) получены, по-видимому, из-за того, что после высоких температур отжига пластические и прочностные свойства МС становятся сопоставимыми со свойствами материала подложки, и при микроиндентировании существенный вклад в результаты вносит уже, непосредственно, сама подложка. Подложка № 2 обладает, напротив, высокой эластичностью и малой твердостью. Она позволяет ленте МС свободно прогибаться под индентором до образования трещин, внося минимальную погрешность в получаемые результаты.

Кристаллизация многокомпонентного аморфного сплава сопровождается образованием кристаллитов с различной микроструктурой [6]. Отмеченное истинное падение нагрузки, необходимой для образования трещин, является следствием изменений, происходящих в поликристаллическом сплаве, т. е. следствием сегрегации примесей по границам зерен, изменения структуры кристаллитов, ростом отдельных зерен. Данные процессы атомных перестроек носят термоактивационный характер, и в связи с этим, вероятно, зависимость нагрузки для образования трещин при микроиндентировании МС от температуры отжига является экспоненциальной.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что зависимость вероятности образования трещин от нагрузки на индентор является линейной для любых температур отжига и не зависит от характеристик используемых подложек.

2. Адекватность результатов *U*-метода с данными микроиндентирования МС на эластичных подложках делает предпочтительным их использование для определения механических характеристик тонколистовых металлических стекол.

3. Экспоненциальное снижение нагрузки, необходимой для образования трещин при микроиндентировании МС после отжига при высоких температурах, обусловлено перераспределением компонентов сплава, изменением его структуры, ростом отдельных кристаллов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Sestak J.* Role thermal annealing during processing of metallic glasses // *Thermochimica Acta.* 1987. V. 110. P. 427-436.
2. *Pampillo C.A., Polk D.E.* Annealing embrittlement in a iron-nickel based metallic glass // *Mater. Sci. and Eng.* 1978. V. 33. № 2. P. 275-280.

3. *Бетехтин В.И., Голиханданов Е.Л., Кадомцев А.Г., Кипяткова А.Ю., Толочко О.В.* Влияние отжига на избыточный свободный объем аморфных сплавов // *ФТТ.* 2000. Т. 42. Вып. 8. С. 1420-1424.
4. *Федоров В.А., Ушаков И.В.* Влияние отжига на изменение характера деформирования и разрушения металлического стекла при локальном нагружении // *ЖТФ.* 2001. Т. 71. Вып. 6. С. 28-31.
5. *Ushakov I.V., Feodorov V.A., Permyakova I.J.* Investigation of brittleness annealed metallic glass by both microindentation and U-method // *Proceeding of SPAS, Sixth International Workshop on New Approacher to High-Tech: Non-destructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering.* 12-17 June 2001. St. Petersburg, NDTCS-2002. V. 6. E57-E58.
6. *Манохин А.И., Митин Б.С., Васильев В.А., Ревякин А.В.* Аморфные сплавы. М.: Металлургия, 1984. 160 с.

## БЛАГОДАРНОСТИ:

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, грант № 01-01-00403.

Авторы благодарят профессора В.А. Хоника за предоставленные для исследований ленты металлического стекла.

Поступила в редакцию 12 февраля 2003 г.