

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

© Д.Ю. Федотов, В.А. Федоров, Т.Н. Плужникова,
А.В. Яковлев, С.А. Сидоров, Л.А. Новгородов

Ключевые слова: аморфные металлические сплавы; ползучесть; морфология поверхности; разрушение. Исследованы закономерности деформации различных аморфных и нанокристаллических металлических сплавов в условиях нестационарной ползучести. Установлено, что деформация аморфных и нанокристаллических сплавов в условиях нестационарной ползучести носит ступенчатый характер. Отмечено, что ниже температуры кристаллизации деформация протекает гетерогенно, выше – гомогенно. Изучены морфологические особенности состояния поверхностей образцов и поверхностей разрушения на различных стадиях ползучести.

ВВЕДЕНИЕ

Металлические стекла (МС) во многих отношениях подобны обычным стеклам и жидким металлам [1]. Одним из удивительных свойств аморфных сплавов является их способность к пластическому течению. В аморфном твердом теле нет трансляционной симметрии и нет, следовательно, дислокаций в классическом понимании природы этого дефекта [2]. Аморфное твердое тело, следовательно, должно быть абсолютно хрупким. Но в МС пластическая деформация все же происходит. Пластическая деформация в аморфных сплавах может протекать гомогенно или негомогенно. При гомогенной пластической деформации однородно нагруженный образец испытывает однородную деформацию. При негомогенной деформации пластическое течение локализовано в тонких дискретных полосах сдвига, а остальной объем твердого тела остается недеформированным. Изучение смены механизмов течения представляет собой сложную экспериментальную задачу. Вопросы эволюции структуры металлических стекол относятся к ряду наиболее значимых проблем физики сильно неупорядоченных систем. Главная трудность заключается в способе описания структуры аморфного состояния. Актуальной задачей физики неупорядоченных сред является изучение пластическо-

го течения МС, а также расширение числа методов исследования их механических свойств.

В связи с этим *целью работы* было исследование закономерностей деформации и разрушения различных аморфных и нанокристаллических металлических сплавов в условиях нестационарной ползучести.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения исследований использовали ленты аморфных сплавов на основе Co систем: Co-Fe-Mn-Si-Cr-B-Ni (АМАГ-170, АМАГ-179, АМАГ-180), Co-Fe-Mn-Si-B-Cr (АМАГ-183, АМАГ-186) и ленты нанокристаллического сплава на основе железа Fe-Cu-Nb-Si-B (АМАГ-200), полученных методом спиннингования. Объектами исследования служили образцы размером 55×3,5×0,02 мм. Элементный состав сплавов приведен в табл. 1.

Для проведения испытаний на ползучесть была создана установка и разработана методика проведения эксперимента. Схема установки изображена на рис. 1. Образец закрепляли между двумя зажимами, один из которых неподвижно соединялся с верхней частью установки, нижний зажим, в свою очередь, крепился к образцу и оставался в свободном состоянии, тем самым нагружая образец с силой ($F = 0,94$ Н). После этого об-

Таблица 1

Элементный состав сплавов

Тип сплава	Al, %	Si, %	Cr, %	Mn, %	Fe, %	Co, %	Ni, %	Cu, %	Nb, %	La, %
АМАГ-170	0,22	9,14	1,44	7,05	4,60	68,20	9,35	–	–	–
АМАГ-172	0,33	8,50	1,60	1,31	5,08	72,38	10,80	–	–	–
АМАГ-179	0,22	11,74	1,42	1,89	6,26	70,42	8,06	–	–	–
АМАГ-180	0,32	8,78	1,64	2,30	4,09	77,92	4,96	–	–	–
АМАГ-183	0,23	8,81	1,42	4,43	2,34	82,77	–	–	–	–
АМАГ-186	0,37	6,04	0,85	2,57	3,73	86,44	–	–	–	–
АМАГ-200	0,25	9,28	0,06	–	82,54	–	–	1,53	5,72	0,62

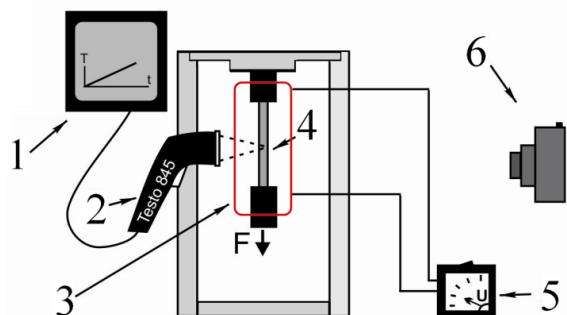


Рис. 1. Схема установки: 1 – компьютер; 2 – прибор для измерения температуры (Testo 845); 3 – печь; 4 – образец; 5 – источник питания; 6 – видеокамера

разец помещали в печь. В ходе экспериментов нагрев образцов определяли прибором Testo 845. Скорость нагрева составляла $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Удлинение образцов фиксировали на цифровую видеокамеру. Затем производили покадровую развертку видеосъемки, на основании которой определяли изменение длины образца в течение всего эксперимента.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам измерений были построены зависимости относительной деформации образцов от времени. На рис. 2 и 3 приведены зависимости для сплавов АМАГ-183 и АМАГ-200 соответственно. Отмечено, что деформация образцов носит ступенчатый характер.

Установлено, что разрыв образцов сплавов на основе Со происходит при относительной деформации, достигающей 25 %, и температуре $\sim 600\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сплав АМАГ-200 при заданных условиях эксперимента не разрушается и деформируется в среднем до 8 %. Установлено, что в сплавах на основе Со ниже температуры кристаллизации деформация протекает гетерогенно, выше – гомогенно.

Формирование ступеней на зависимости $\varepsilon(t)$ связано с тем, что при появлении кристаллов полосы сдвига блокируются на них, а деформация не развивается. Этому соответствуют длительные временные периоды постоянной по величине деформации. С ростом температуры растет число кристаллов и число полос сдвига, деформация становится гомогенной, а блокировка полос деформации – значительно меньшей по времени. Ползучесть переходит в состояние установившегося течения.

На рис. 4 и 5 приведены морфологические особенности поверхности образцов сплава АМАГ-186 на различных стадиях эксперимента.

Видно, что нагревание образцов приводит к появлению на поверхности различных образований, размер которых с увеличением температуры нагрева возрастает. Исследованиями элементного состава установлено, что они являются оксидами различных составляющих сплава.

Исследования структурного состояния аморфных сплавов на различных стадиях нагрева проводили на поверхностях излома образцов. Для этого образцы после нагрева до определенной температуры извлекали

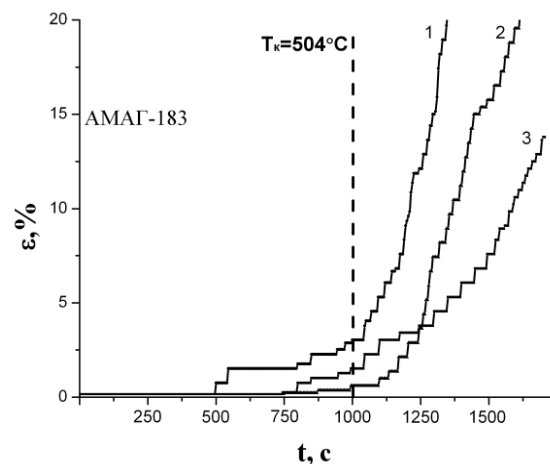


Рис. 2. Зависимости относительной деформации (ε , %) от времени (t , с) для образцов сплава АМАГ-183, T_k – температура кристаллизации

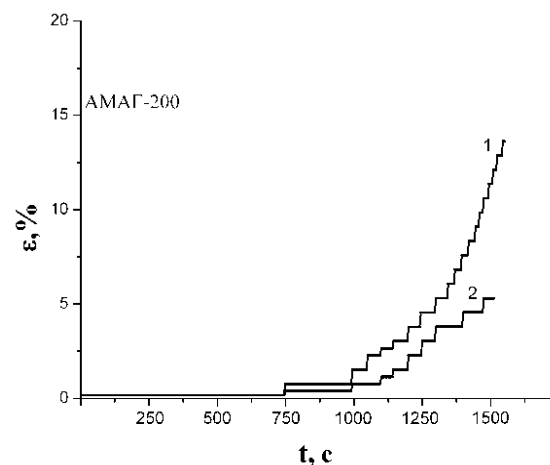


Рис. 3. Зависимости относительной деформации (ε , %) от времени (t , с) для образцов сплава АМАГ-200

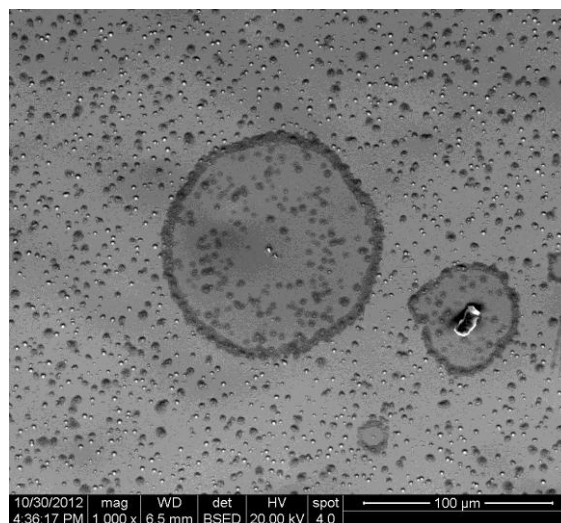


Рис. 4. Образование оксидных частиц на поверхности образцов сплава АМАГ-186, подвергнутых нагреву $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

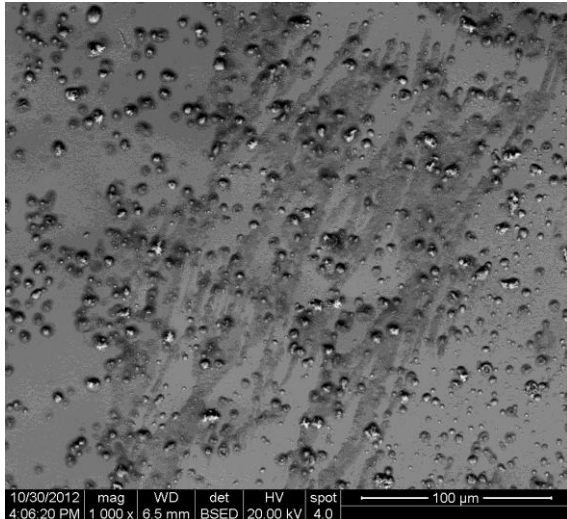


Рис. 5. Рост оксидных частиц на поверхности образцов сплава АМАГ-186, подвергнутых нагреву 600 °С

из установки и разрушали методом на изгиб. На рис. 6, 7 приведены морфологические особенности поверхности разрушения образцов сплава АМАГ-186 на различных стадиях эксперимента. Установлено, что у образцов при температуре нагрева более 400 °С наблюдается ярко выраженная зеренная структура. С увеличением температуры нагрева образца увеличивается размер кристаллов. При нагреве до 400 °С их размер составляет ~100 нм, при нагреве до 500 и 600 °С ~250 и ~500 нм соответственно.

На рис. 8 показан характер разрушения образцов сплава АМАГ-180, из которого видно, что разрушение образцов происходит вязко при температуре выше 600 °С. Видно также (рис. 9), что зерна кристаллов текстурированы вдоль оси растяжения. Установлено, что в области разрушения (рис. 10) толщина образца в результате образования утяжки уменьшается до размера ~1 мкм.

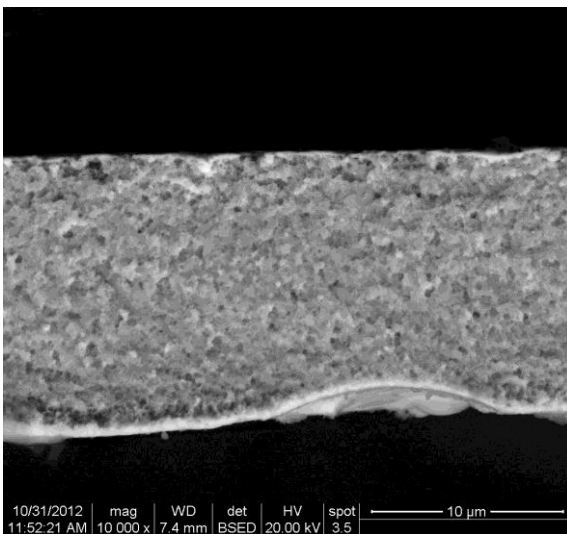


Рис. 6. Зеренная структура на поверхности разрушения образцов сплава АМАГ-186, подвергнутых нагреву 500 °С

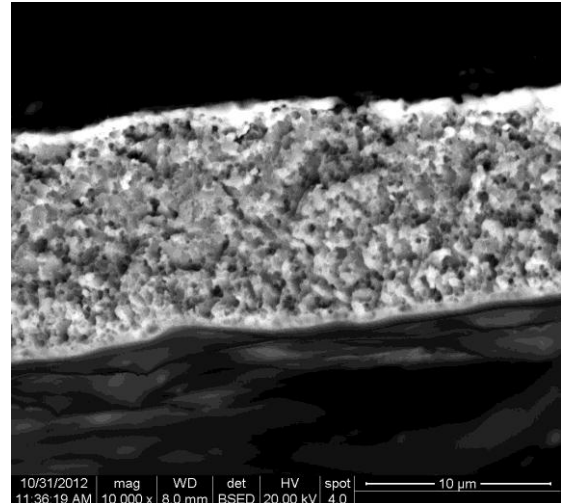


Рис. 7. Зеренная структура на поверхности разрушения образцов сплава АМАГ-186, подвергнутых нагреву 600 °С

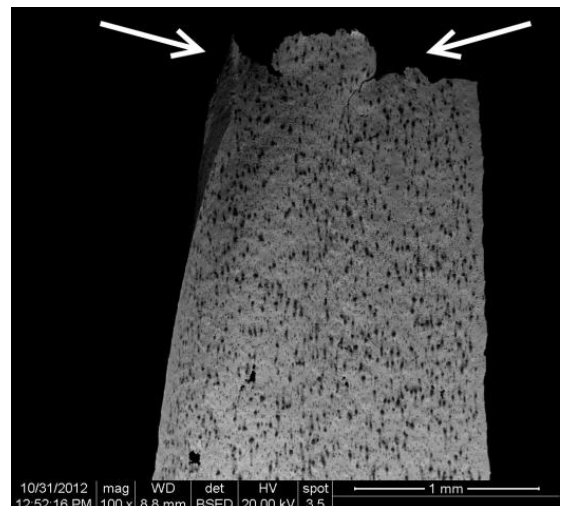


Рис. 8. Характер разрушения образца сплава АМАГ-180 (стрелками показана траектория разрушения)

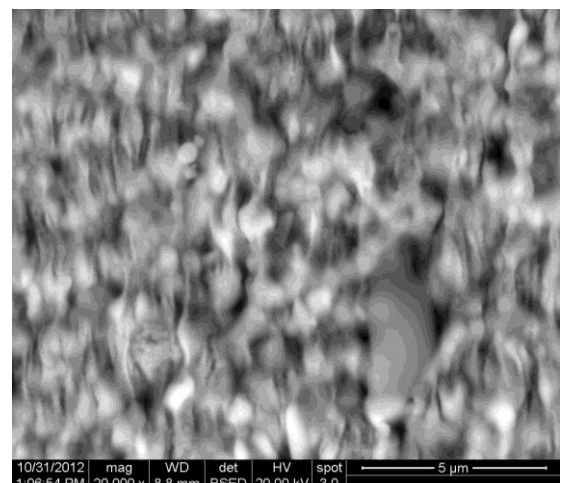


Рис. 9. Формирование текстуры в образце сплава АМАГ-180 при температуре выше 600 °С

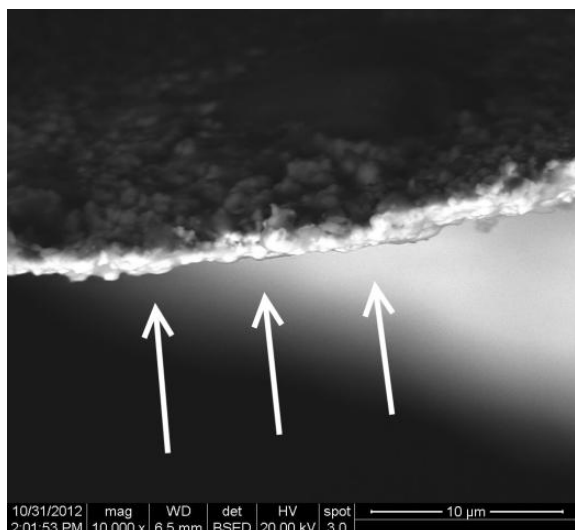


Рис. 10. Поверхность разрушения образца сплава АМАГ-180

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментально установлено, что деформация аморфных и нанокристаллических сплавов в условиях нестационарной ползучести носит ступенчатый характер. Отмечено, что в аморфных сплавах первые скачки деформации появляются до температуры кристаллизации. По мере роста температуры сокращается время между соседними скачками, а величина самого скачка деформации остается практически постоянной.

Установлено, что удлинение образцов при испытаниях на ползучесть зависит от структурного состояния сплавов. Аморфные металлические сплавы на основе Со обладают большей пластичностью по сравнению с нанокристаллическим сплавом на основе железа. Отно-

сительная деформация сплавов на основе Со в среднем достигает 25 %. Ниже температуры кристаллизации деформация протекает гетерогенно, выше – гомогенно. Комбинированное воздействие нагрузки и температуры сопровождается зарождением и ростом на поверхности образца частиц оксидов. Разрушение аморфных сплавов при температуре выше 600 °С носит вязкий характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Манохин А.И., Митин Б.С., Васильев В.А., Ревякин А.В. Аморфные сплавы. М.: Металлургия, 1984. 160 с.
2. Глезер А.М., Утевская О.Л. Разработка методики измерения механических свойств тонких ленточных материалов // Композиционные прецизионные материалы: тематический отраслевой сборник (МЧМСССР) / под ред. Б.В. Молотилова. М.: Металлургия, 1983. С. 78-82.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-01-00638) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг. (проект № 14.В37.21.1161).

Поступила в редакцию 23 ноября 2012 г.

Fedotov D.Y., Fedorov V. A, Pluzhnikova T.N., Yakovlev A.V., Sidorov S.A., Novgorodov L.A. STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF METALLIC GLASSES IN NONSTATIONARY CREEP CONDITIONS

The patterns of deformation of various amorphous and nanocrystalline metallic alloys in nonstationary creep conditions are examined. It is established that the dependence of the relative deformation of samples on time has a stepwise character. It is noted that deformation below the crystallization temperature proceeds heterogeneously, above – homogeneously. The morphological features of surface samples conditions and surfaces of destruction at various stages of creep are studied.

Key words: amorphous metal alloys; creep; morphology of surface; destruction.