

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВОВ В ПЕРЕМЕННОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Березнер А.Д., Яковлев А.В., Федотов Д.Ю.

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, Тамбов, Россия,  
[qwert1009@mail.ru](mailto:qwert1009@mail.ru)

Аморфные металлические сплавы или металлические стекла обладают рядом уникальных физико-механических свойств, таких как высокая прочность, коррозионная и радиационная стойкость и др. Они представляют большой интерес для промышленного использования и могут работать в экстремальных условиях.

Цели работы: 1. Исследовать деформационное поведение аморфного и нанокристаллического металлических сплавов в исходном состоянии при комбинированном воздействии переменного температурного поля и постоянной нагрузки, а также провести аналогичные исследования для отожженных образцов; 2. Рассмотреть влияние нагрева на состояние поверхности аморфных и нанокристаллического сплавов в воздушной среде.

## Материалы и методика исследования

В экспериментах использовались аморфные металлические сплавы на основе кобальта и нанокристаллический сплав на основе железа, элементный состав которых представлен в табл. 1.

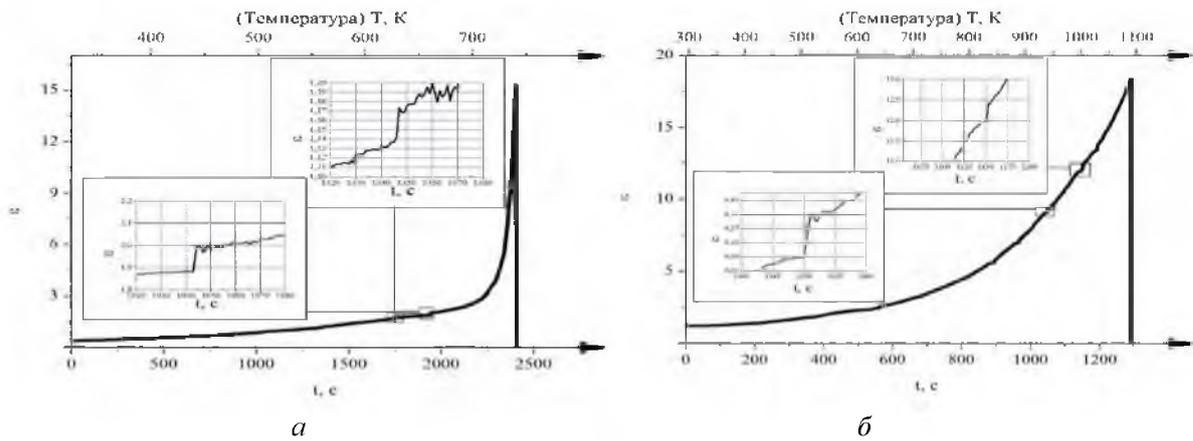
Таблица 1. Элементный состав сплавов

Вид сплава	Co %	Fe %	Ni %	Si %	Mn%	B%	Cr %	Cu %	Nb %
АМАГ-170	70,42	4,7	10,46	9	2,1	2	1,3	-	-
АМАГ-179	78,1	3,31	8,19	5,48	1,61	2	1,31	-	-
АМАГ-180	78,65	4,03	4,73	7,22	1,88	2	1,49	-	-
АМАГ-183	82,69	2,21	-	7,77	4,19	2	1,14	-	-
АМАГ-186	85,41	2,27	-	5,15	4,07	2	1,1	-	-
АМАГ-200	-	80,2	-	8,25	-	-	-	1,5	10,1

Объектами исследования служили ленточные образцы размером 55×3,5×0,02 мм. Образец, вместе с закрепленным грузом помещался в печь и нагревался в температурном интервале от 300 до 1200 К. Скорость нагрева линейна и составляла ~ 1 К/с. Температура образца фиксировалась лазерным пирометром Testo-845. Удлинение образцов измерялось триангуляционным датчиком. Для определения кристалличности структуры выполнялись рентгенографические исследования на дифрактометре Rigaku Ultima IV. Предварительный отжиг лент производился в печи при температуре 673 К, в течении 10 мин, в воздушной среде.

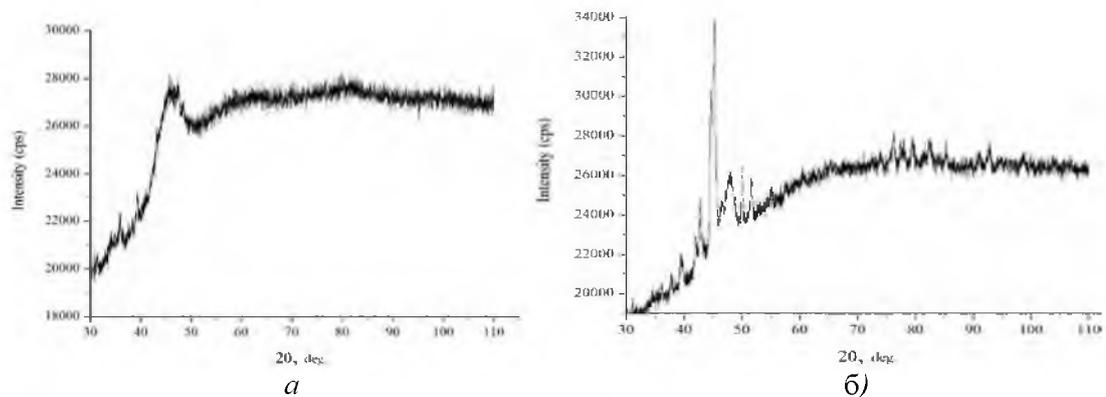
## Экспериментальные результаты и их обсуждение

*Ползучесть аморфных и нанокристаллических сплавов в воздушной среде.* Экспериментально установлено, что при нагреве образцы аморфных сплавов деформируются неоднородно. На кривых ползучести для всех исследуемых аморфных сплавов наблюдаются участки скачкообразной деформации (рис. 1).



**Рис. 1.** Кривые удлинения образцов от времени воздействия для металлических сплавов на основе: *а)* аморфный 85% Co, *б)* нанокристаллический 80% Fe. На вставках представлены увеличенные участки кривых

Методами дифференциальной сканирующей калориметрии были установлены температуры кристаллизации сплавов ( $T_{кр}$ ), что позволило сопоставить значения этой температуры с промежутками скачкообразной деформации. Экспериментально установлено, что деформационная неоднородность возникает преимущественно вблизи пиков заверченной кристаллизации сплавов. Рентгенографические исследования лент показали, что при температурах до 600 К наблюдается аморфное гало, выше 600 К наблюдаются пики кристаллизации (рис. 2). Таким образом, скачки пластической деформации, наблюдаемые в экспериментах, по-видимому, связаны с температурой кристаллизации.



**Рис. 2.** Дифрактограммы сплава АМАГ-180 при: *а)*  $T = 300$  К, *б)*  $T = 773$  К

*Разрушение аморфных и нанокристаллического сплавов.* Отмечено, что образцы на основе кобальта разрушаются вязко [1] и в местах разрыва вытягиваются, образуя волнообразный рельеф. Образцы нанокристаллического сплава на основе железа разрушаются хрупко. Установлено, что при испытаниях на ползучесть в температурном поле образцы гофрируются.

*Влияние предварительного отжига на процесс ползучести в температурном поле.* Эксперименты показали, что предварительный отжиг исследуемых лент на основе кобальта и железа приводит к деформации без возникновения скачков. Однако при этом на кривых ползучести аморфных образцов обнаружены затухающие колебания, представленные на рис.3.

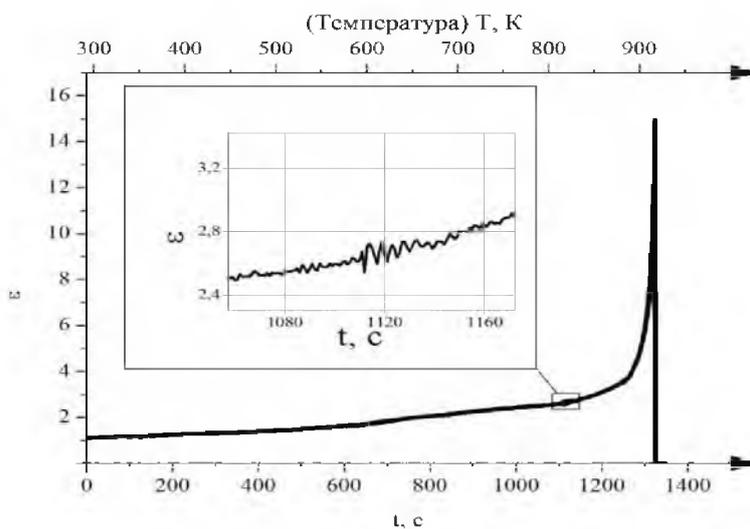


Рис. 3. Кривая ползучести предварительно отожженного сплава: АМАГ-179.



Рис. 4. Фотография образца АМАГ-186 прошедшего испытание на ползучесть. Стрелками отмечены линия разрыва ленты и контур незавершенного плавления.

величины равной толщине образца. У образцов без предварительного отжига происходит образование расплавов и уменьшается площадь поперечного сечения, что приводит к увеличению нагрузки на оставшуюся (недеформированную) часть ленты. В результате образец резко удлиняется. При предварительном отжиге, окисление поверхности сплава происходит равномерно, поэтому образование расплавов протекает без скачков. Таким образом, окисление образцов связано с кристаллизацией аморфной матрицы и может являться дополнительным источником возникновения неоднородной деформации.

### Выводы

1. Процесс ползучести аморфных металлических сплавов в температурном поле является неравномерным. Наблюдаются скачки деформации, связанные с образованием локализованных областей плавления и сдвига;
2. Предварительный отжиг приводит к увеличению вязкости структуры сплавов. Это проявляется в виде колебаний на кривых ползучести;
3. Окисление влияет на количество концентраторов напряжения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №15-01-04553-а) и гос. задания (проект №2476)*

Это может быть связано с уменьшением структурной вязкости и образованием локализованных полос сдвига, возникновение которых проявляется в кобальтовых сплавах в виде упругих колебаний с меньшей жесткостью. В качестве иллюстрации механизма возникновения областей локализованного течения на рис. 4 представлен вид ленты, с присутствием области незавершенного плавления.

Фурье-анализ колебаний деформации ползучести показывает что их частота совпадает с собственной частотой колебаний образца. Кривые термической деформации нанокристаллических сплавов сохраняют монотонность на всем интервале нагрева. Установлено, что поверхность отожженных лент окисляется сильнее и распределение очагов термического пittingа более равномерное, нежели чем у лент, не подвергавшихся предварительному отжигу. Это, по-видимому, связано с наличием исходных центров кристаллизации в отожженных образцах. Максимальная глубина очагов окисления достигает

## Список литературы

1. Яковлев А.В., Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Кириллов А.М., Зайцев С.А., Федотов Д.Ю., Сидоров С.А., Буланкин А.С. Влияние нагрева и деформации на механические свойства аморфных и нанокристаллических металлических сплавов на основе Co и Fe // Вестник ТГУ. Серия Естественные и технические науки. 2012. №17. С. 144-146.