

PACS numbers: 07.10.Lw, 46.50.+a, 61.43.Dq, 62.20.M-, 62.23.Kn, 62.25.Mn, 81.70.Bt

## Прочность аморфных лент на основе Fe

А. В. Зацарная, С. А. Котречко, В. К. Носенко, А. М. Семирга,  
А. В. Филатов

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,  
бульв. Акад. Вернадского, 36,  
03680, ГСП, Киев-142, Украина*

В данной работе приведены экспериментальные данные о напряжении разрушения аморфных лент на основе железа. Исследование лент с разным содержанием таких добавок как Co и Mo позволило сделать вывод об их влиянии на прочность аморфного сплава. Анализ экспериментальных данных о напряжениях разрушения аморфных лент в рамках трёхпараметрического распределения Вейбулла позволил дать оценку пороговых напряжений разрушения исследуемых сплавов. Также было установлено, что кривые плотности распределения значений разрушающих напряжений исследованных лент являются практически симметричными для всех сплавов. В этом проявляется их отличие от распределения прочности типичных хрупких материалов (керамики, стекла и т.д.), кривые распределения которых характеризуются значительной асимметрией в области малых величин напряжения разрушения.

В даній роботі наведено експериментальні дані стосовно напруження руйнування аморфних стрічок на основі заліза. Дослідження стрічок з різним вмістом домішок, таких як Co та Mo, уможливило зробити висновок про їх вплив на міцність аморфного стопу. Аналіз експериментальних даних про напруження руйнування аморфних стрічок у рамках трипараметричного Вейбуллового закону уможливив оцінити порогові напруження руйнування досліджуваних стопів. Також було встановлено, що криві густини розподілу значень напружень руйнування досліджуваних стрічок є майже симетричними для всіх стопів; в цьому виявляється їх відмінність від розподілу міцності типових крихких матеріалів (кераміки, скла тощо), криві розподілу яких характеризуються значною асиметрією в області малих значень напруження руйнування.

A given work presents the experimental evidence on fracture stress of amorphous tapes made on the base of an iron. Investigation of the tapes with different content of such alloying elements as Co and Mo enables to conclude about their influence on amorphous alloy strength. Approximation of exper-

imental data on fracture stress of amorphous tapes by means of the three-parameter Weibull distribution allows estimating threshold fracture stresses of studied alloys. As also ascertained, the curves of distribution density for fracture stresses of analysed tapes are symmetric for all alloys. This is their difference from strength distribution for typical brittle materials (ceramics, glasses, etc.) described by distribution curves, which are essentially asymmetric within the range of low fracture stresses.

**Ключевые слова:** аморфные ленты, напряжение разрушения, распределение Вейбулла.

*(Получено 19 ноября 2013 г.; после доработки — 17 декабря 2013 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Открытые в середине 20-го века «металлические стекла» (металлические сплавы с аморфной структурой, получаемые сверхбыстрой закалкой из расплава) стали остро востребованными и широко применяемыми в мировой промышленности уже в 90-х годах [1]. Около 90% процентов аморфных и нанокристаллических сплавов, производимых сейчас в мире, используются в качестве магнитомягких материалов, в то время как крайне высокий уровень прочностных свойств [2, 3], характерных для аморфных сплавов, на промышленном уровне остаётся нереализованным. Основными причинами такого одностороннего применения аморфных материалов являются: высокая себестоимость материалов вследствие необходимости применения чистых исходных элементов и, соответственно, сложности технологического процесса получения аморфных материалов с использованием спецоборудования для плавки в защитной среде; относительно низкая склонность металлических расплавов к аморфизации, ограничивающая геометрические размеры получаемых изделий; низкий уровень макроскопической пластичности металлических стёкол, связанный со специфическим характером пластической деформации в них.

С целью создания новых классов функциональных и конструкционных аморфных и нанокристаллических материалов с предельными эксплуатационными параметрами, особенно актуальными являются работы, направленные на создание новых сплавов с высокой способностью к аморфизации и упрощённой технологии получения в части использования исходных материалов промышленной чистоты, не требующих использования сложного технологического оборудования. В связи со сказанным выше, актуальным являются исследования влияния химического состава разрабатываемых сплавов, их геометрии, технологических режимов на механические свойства получаемых изделий.

Исследования предусматривали выполнение испытаний на одно-

осное растяжение аморфных плёнок на основе Fe с различным содержанием Ni, Co, Mo, Cr при комнатной температуре:

1. NHRS-(Co-1) —  $\text{Fe}_{45}\text{Ni}_{19,4}\text{Cr}_{5,7}\text{Mo}_{1,9}\text{Co}_{8,5}\text{B}_{14}\text{Si}_{5,5}$ ,
2. NHRP-4 —  $\text{Fe}_{50,0}\text{Ni}_{19,0}\text{Cr}_{6,6}\text{Mo}_{1,5}\text{V}_1\text{B}_{14,1}\text{C}_{2,5}\text{P}_{4,4}\text{Si}_1$ ,
3. HBKNV-2 —  $\text{Fe}_{31,14}\text{Co}_{32}\text{Cr}_6\text{W}_{1,79}\text{Nb}_{4,67}\text{B}_{19,1}\text{C}_2\text{Si}_{3,3}$ ,
4. NHRS-(Co-2) —  $\text{Fe}_{45}\text{Ni}_{22,8}\text{Cr}_{5,7}\text{Mo}_2\text{Co}_5\text{B}_{14}\text{Si}_{5,5}$ ,
5. NHRS-19 —  $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{15,5}\text{Cr}_{6,5}\text{Mo}_1\text{B}_{16}\text{Si}_4$ .

Определение прочности аморфных лент выполнялось путём стандартных испытаний на одноосное растяжение. Испытания выполнялись на универсальной машине для механических испытаний Instron. Из ленты нарезались образцы таким образом, чтобы рабочая длина образца составляла 10 ширины, а также с обеих сторон оставалось по 9 см для зажатия ленты в захватах. Значения толщины, ширины и длины образцов приведены в табл. 1.

Образцы в виде лент испытывались на одноосное растяжение. В процессе испытаний записывалась кривая нагружения в координатах усилие–перемещение.

Напряжение разрушения определялось по стандартной (ГОСТ 11701-84) формуле  $\sigma = P / F_0$ , где  $F_0$  — начальная площадь поперечного сечения образца,  $P$  — нагрузка в момент разрушения.

Анализ диаграмм деформации аморфных плёнок показал, что деформация, предшествующая разрушению, является упруго-нелинейной. С погрешностью, не превышающей 3%, не было зафиксировано наличие остаточных деформаций. Применение техники скоростной съёмки позволило оценить время процесса разрушения. Для исследованной плёнки оно не превышает  $1 \cdot 10^{-3}$  с.

Полученные значения напряжения разрушения для разных лент сведены в табл. 2.

Во время испытаний на одноосное растяжение образцы ленты NHRS разрывались на два куска в границах рабочей зоны, в то время как на образцах HBKNV-2 наблюдалось многоочаговое разрушение. Это хорошо видно на фотографиях, приведённых на рис. 1.

Статистическая обработка экспериментальных данных по напряжениям разрушения позволила определить минимальное, максимальное и среднее напряжения разрушения, дисперсию и коэффициент вариации, значения которых приведены в табл. 3.

Как видно из приведённой выше таблицы, уменьшение ширины ленты NHRS-Co-1 с 10 мм до 6,5 мм приводит к увеличению средней величины напряжения разрушения с 930 МПа до 1034 МПа, увеличивая также и дисперсию, что свидетельствует о большем разбросе значений напряжения разрушения.

ТАБЛИЦА 1. Размеры образцов.

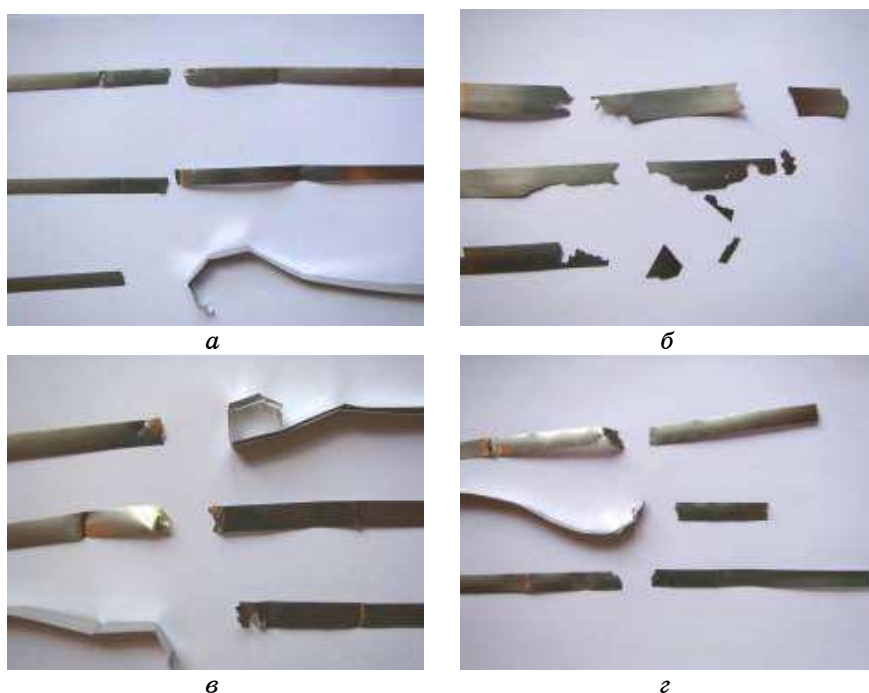
Сплав	NHRS-(Co-1)	NHRS-(Co-1)	NHRP-4	HBKNV-2	NHRS-(Co-2)	NHRS-19
Толщина, мм	0,02	0,022	0,023–0,026	0,02–0,03	0,025	0,02–0,025
Ширина, мм	6,5	10,1	10	12	10,3	10
Длина рабочей части, мм	65	101	100	120	100	100

ТАБЛИЦА 2. Значения напряжения разрушения для разных лент.

Номер образца	NHRS-Co-1 шириной 10 мм	NHRS-Co-1 шириной 6,5 мм	NHRP-4	HBKNV-2	NHRS-(Co-2)	NHRS-19
	Напряжение разрушения, МПа					
1	1050	1212	880	520	1080	1330
2	1000	1250	800	590	1100	1280
3	850	1250	850	520	1240	1130
4	950	1300	600	560	1100	1050
5	990	1050		200	1100	1000
6	940	1175		140	1150	1100
7	880	1080		120	1020	1100
8	950	950		300	800	1020
9	830	1210		90	1130	1080
10	860	1050			1200	1120
11		850			850	1060
12		800			1080	970
13		750			1050	1040
14		550			800	900
15					950	890

**ТАБЛИЦА 3.** Статистическая обработка экспериментальных данных.

	NHRS-Co-1 шириной 10 мм	NHRS-Co-1 шириной 6,5 мм	NHRP-4	HBKNV-2	NHRS-(Co-2)	NHRS-19
Минимальное значение	830	550	600	90	800	890
Максимальное значение	1050	1300	880	590	1240	1280
Среднее значение	930	1034	782	342	1043	1052
Дисперсия	72	225	126	210	136	99
Коэффициент вариации	0,078	0,22	0,16	0,61	0,13	0,094



**Рис. 1.** Внешний вид разрушенных образцов: *a* — NHRS-(Co-1) шириной 6,5 мм; *б* — NBKNV-2; *в* — NHRS-(Co-1) шириной 10 мм; *г* — NHRS-(Co-2).

Если сравнить между собой результаты измерений, полученные на лентах NHRS-Co-1 и NHRS-Co-2, а также их химический состав, можно сделать допущение, что к увеличению среднего и максимального значений напряжений разрушения приводит увеличение количества Ni при уменьшении доли Co.

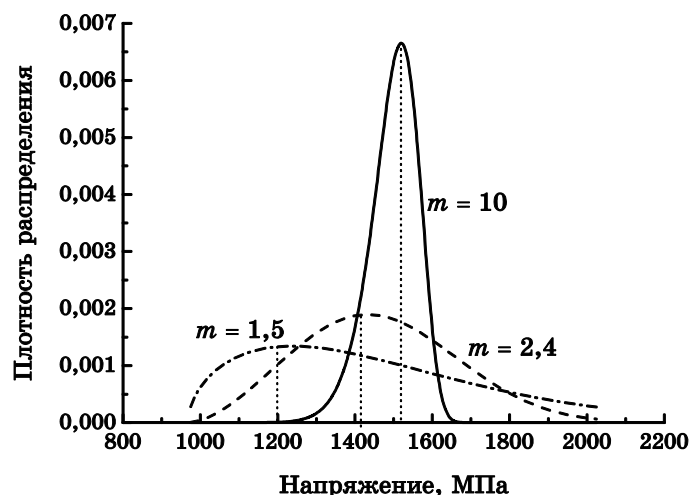
Наибольшее среднее значение напряжений разрушения, а также один из наименьших коэффициентов вариации были получены на образцах сплава NHRS-19, в котором полностью отсутствует Co, а также уменьшена доля Mo по сравнению с NHRS-(Co-2).

При анализе разрушения аморфных сплавов широко используется распределение Вейбулла [4–6] (рис. 2)

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma - \sigma_{th}}{\sigma_u} \right)^m \right],$$

где  $P(\sigma)$  — вероятность разрушения при заданной величине напряжения  $\sigma$ ;  $\sigma_{th}$  — пороговое напряжение;  $\sigma_u$ ,  $m$  — параметры распределения.

Для оценки степени хрупкости сплава используется значение  $m$



**Рис. 2.** Функция плотности распределения напряжения разрушения для разных значений модуля Вейбулла при  $\sigma_{th} = 969,8$  и  $\sigma_u = 14,5$  МПа.

(модуль Вейбулла). Как правило, для хрупких керамик значение  $m = 5$  [7]. Для аморфных сплавов на основе циркония  $Zr_{48}Cu_{45}Al_7$  —  $m = 73,4$ , для более хрупкого варианта этого сплава  $(Zr_{48}Cu_{45}Al_7)_{98}Y_2$  —  $m = 25,5$  [8]. Для более пластичных сплавов на основе марганца в работе [9] было получено значение  $m = 35$ .

Использование трёхпараметрического распределения Вейбулла для аппроксимации экспериментальных данных испытаний аморфных лент на одноосное растяжение позволило определить пороговое значение напряжения разрушения и параметры распределения Вейбулла (табл. 4). Экспериментальные данные напряжения разрушения на образцах NHRP-4 не анализировались из-за их малого количества.

В рамках изложенного выше подхода, исследуемые сплавы следует рассматривать как наиболее хрупкие, однако при малых значениях  $m$  меняется характер асимметрии кривой плотности распределения (рис. 2), что может свидетельствовать о смене микромеханизма инициирования разрушения. Таким образом, величина параметра  $m$  может нести информацию о механизме инициирования разрушения, который обусловлен структурным состоянием.

При полученных параметрах кривые плотности распределения значений разрушающих напряжений исследованных лент являются практически симметричными для всех сплавов (рис. 3). В этом проявляется их отличие от распределения прочности типичных хрупких материалов (керамики, стекла и т.д.), кривые распределения которых характеризуются значительной асимметрией в области малых величин напряжения разрушения.

ТАБЛИЦА 4. Значения параметров распределения Вейбулла.

Сплав	$\sigma_{th}$ , МПа	$m$	$\sigma_u$ , МПа
NHRS-Co-1 шириной 10 мм	740	2,4	170
NHRS-Co-1 шириной 6,5 мм	250	3,2	800
HBKNV-2	20	3	250
NHRS-(Co-2)	600	2,5	400
NHRS-19	600	5	450

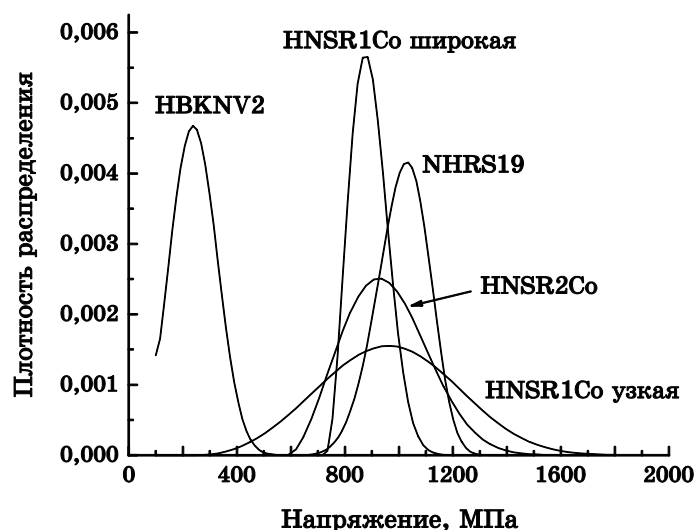


Рис. 3. Функции плотности распределения напряжения разрушения исследуемых аморфных лент.

## 2. ВЫВОДЫ

Изменение ширины ленты NHRS-(Co-1) с 10 мм до 6,5 мм приводит к увеличению её прочности, однако в тоже время наблюдается эффект охрупчивания, проявлением которого в данном случае является увеличение разброса значений прочности.

Наибольшее среднее значение напряжения разрушения, а также один из наименьших коэффициентов вариации были получены на образцах сплава NHRS-19, в котором полностью отсутствует Co, а также уменьшена доля Mo. В целом, этот сплав имеет наилучшие свойства по трём показателям: среднему значению прочности; величине минимального напряжения разрушения и коэффициенту вариации значений прочности.

Кривые плотности распределения значений разрушающих напряжений исследованных лент, являются практически симмет-



ричными для всех исследованных сплавов. В этом проявляется их отличие от распределения прочности типичных хрупких материалов, кривые распределения которых характеризуются значительной асимметрией в области малых величин напряжения разрушения.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА—REFERENCES

1. H. Warlimont, *Mater. Sci. Eng. A*, **304–306**: 61 (2001).
2. D. Raskin and C. H. Smith, *Amorphous Metallic Alloys* (Ed. F. E. Luborsky) (London: Butterworths: 1983), ch. 20, p. 381.
3. M. F. Ashby, *Scr. Mater.*, **54**: 321 (2006).
4. Y. H. Lai, C. J. Lee, Y. T. Cheng, H. S. Chou, H. M. Chen, X. H. Dua, and C. I. Chang, *Scripta Materialia*, **58**: 890 (2008).
5. Yuan-Yun Zhao, E. Maband, and Jian Xu, *Scripta Materialia*, **58**: 496 (2008).
6. A. S. Bakai, A. P. Shpak, N. Wanderka, S. Kotrechko, T. I. Mazilova, and I. M. Mikhailovskij, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **356**: 1310 (2010).
7. D. R. Askeland, *Science and Engineering of Materials* (Boston: PWS Publishing: 1994), p. 152.
8. W. F. Wu, Y. Li, and C.A. Schuh, *Philos. Mag.*, **88**: 71 (2008).
9. C. J. Lee, J. C. Huang, and T. G. Nieh, *Appl. Phys. Lett.*, **91**: 161913 (2007).