

УДК 669.046:621.7.011

*В.А. Федоров, Т.Н. Плужникова, С.А. Сидоров*

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина

## ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ХОД ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ – ДЕФОРМАЦИЯ В АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ\*

**Аннотация.** Исследованы особенности деформации аморфных и нанокристаллических металлических сплавов при импульсном воздействии электрического тока. Установлено, что пропускание импульсного электрического тока приводит к кратковременному сбросу механического напряжения в нагруженных образцах с последующим его восстановлением. Получены зависимости сброса механического напряжения от плотности тока.

**Ключевые слова:** сброс механического напряжения, аморфные металлические сплавы, нанокристаллический сплав, деформация, импульсный электрический ток.

## THE EFFECT OF PULSED ELECTRIC CURRENT ON THE DEPENDENCE MECHANICAL STRESS – DEFORMATION IN AMORPHOUS AND NANOCRYSTALLINE METALLIC ALLOYS

**Abstract.** The paper presents the results of the investigated features of the deformation of amorphous and nanocrystalline metallic alloys under the impact of an electric current. It has been established that the transmission of the pulse electric current leads to a transient release of mechanical stress in the loaded samples with its subsequent restoration. The dependence of the release of mechanical stress on the current density is obtained.

**Keywords:** release of mechanical stress, amorphous metallic alloys, nanocrystalline alloys, deformation, pulsed electric current.

Известно, что пропускание импульса электрического тока по металлическому проводнику, находящемуся в нагруженном состоянии, сопровождается электропластическим эффектом [1]. Исследований этого эффекта в аморфных и нанокристаллических металлических сплавах [2] практически нет, хотя эти сплавы находят широкое применение в различных отраслях промышленности и техники [3 – 10]. Известно также [4], что в аморфных металлических сплавах имеет место структурная релаксация, приводящая к изменению физических свойств материалов и изделий из них. Структурная релаксация, по-видимому, протекает также при нагреве аморфных сплавов, связанным с прохождением импульсного электрического тока. В связи с этим исследование влияния импульсных токов на ход кривых деформации и на структурное состояние является актуальным.

Цель настоящей работы состоит в исследовании влияния импульсного электрического тока на ход зависимостей механическое напряжение ( $\sigma$ ) – деформация ( $\epsilon$ ) в аморфных и нанокристаллических металлических сплавах.

В качестве материалов для исследования воздействий импульсов электрического тока выбраны ленточные

аморфные металлические сплавы на основе кобальта с различным его содержанием и нанокристаллический сплав на основе железа. Содержание кобальта в аморфных металлических сплавах (АМАГ) – от 70 до 86 %. Содержание железа в нанокристаллическом сплаве составляло 80 %. Размеры образцов  $40 \times 3,5 \times 0,02$  мм. Все исследуемые сплавы получены методом спиннингования.

Эксперименты по одноосному растяжению проводили на электромеханической машине Instron-5565 для статических испытаний. Для экспериментов с одновременным воздействием нагрузки и импульсного электрического тока были изготовлены специальные захваты с изолирующими пластинами. Во время деформации образца<sup>1</sup> подавали импульсы тока (путем разрядки конденсатора). Плотность тока ( $j$ ), протекающего через образцы, варьировали от  $1 \cdot 10^8$  до  $5 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>. Использовали импульсы длительностью  $\tau_1 \sim 2,5$  мс и  $\tau_2 \sim 5$  мс. Нагрев образцов в течение всего процесса деформации контролировали лазерным измерителем температуры Testo-845 с частотой  $10$  с<sup>-1</sup>. Фазовый состав исследуемых сплавов до и после воздействия импульсного электрического тока определяли рентгенографическими методами с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA.

Экспериментально установлено, что при деформации образцов из аморфных металлических сплавов (АМС) с одновременным пропусканием импульсного электрического тока на диаграммах  $\sigma$  –  $\epsilon$  наблюдается кратковременный (примерно 1,1 с) сброс механического напряжения ( $\Delta\sigma$ ) с последующим полным восстановлением хода

\* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (проект № 12-01-00638) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 гг.» (проект № 14.В37.21.1161).

<sup>1</sup> Часть исследований выполнена на оборудовании ЦКП «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» Белгородского государственного национального исследовательского университета.

зависимости  $\sigma - \epsilon$  (рис. 1, *a*). Кроме того, пропускание импульсного электрического тока вызывает скачкообразное кратковременное увеличение температуры образцов АМС (рис. 1, *б*). При  $j \geq 4 \cdot 10^9 \text{ A/m}^2$  на зависимости  $\sigma - \epsilon$  АМС имеет место не полностью восстанавливаемый сброс механической нагрузки. Для нанокристаллического сплава на основе железа не полностью восстанавливаемый сброс механического напряжения наблюдается при  $j \geq 8 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ . Такой невосстанавливаемый сброс механического напряжения, по-видимому, связан с необратимыми атомными перестройками в материалах. Пропускание импульсного тока понижает предел прочности материалов. Так, после десяти импульсов электрического тока при  $j = 6 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$  предел прочности в аморфных сплавах снижается в два раза, а в нанокристаллическом сплаве на основе железа – примерно на 40 %.

Установлено, что при одной и той же плотности тока увеличение длительности импульса вызывает пропорционально больший по величине нагрев образцов и, соответственно, больший сброс механического напряжения. Сопоставление зависимостей сбросов механического напряжения от плотности тока при заданной длительности импульса показывает, что для исследуемых сплавов зависимости  $\Delta\sigma(j)$  подобны и могут быть аппроксимированы выражением  $\sigma = \sigma_0 + Ae^{(-j/B)}$ , где  $A$  и  $B$  – числовые коэффициенты, зависящие от элементного состава сплава. Экспоненциальный характер зависимостей (рис. 2) свидетельствует о термоактивационных процессах, происходящих в материалах.

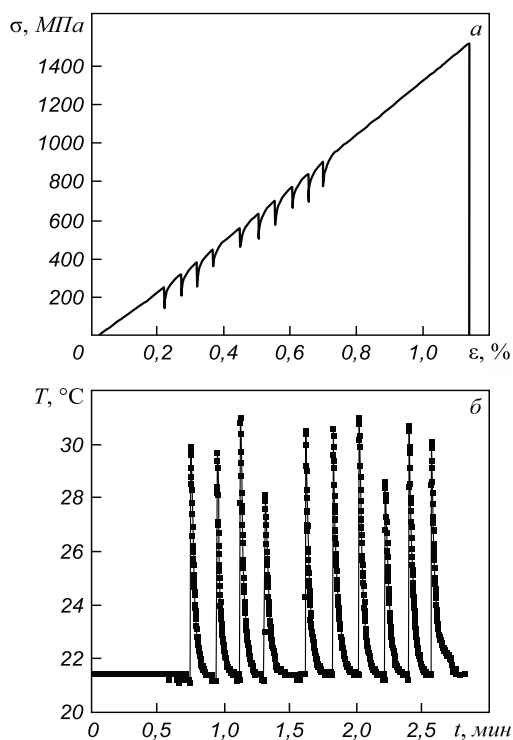


Рис. 1. Диаграмма  $\sigma(\epsilon)$  аморфного сплава на основе кобальта (*a*) и соответствующая ей зависимость температуры нагрева образца с течением времени (*б*) при воздействии десяти импульсами тока длительностью 5 мс

При пропускании импульса электрического тока происходит увеличение температуры образца за счет выделения джоулева тепла. Учет теплового действия тока, включающий точное измерение нагрева образцов и оценку влияния этого нагрева на деформацию образцов, является существенным моментом в исследовании причин сброса механического напряжения.

С этой целью проводили деформацию образцов по следующей схеме. Первоначально образец подвергали растяжению при постоянной (0,1 мм/мин) скорости движения захватов при комнатной температуре. При достижении механической нагрузки, соответствующей моменту сброса механического напряжения на диаграммах  $\sigma - \epsilon$  (рис. 1, *a*) в результате пропускания импульсного тока, деформация прекращалась, но нагрузку при этом с образцов не снимали. После этого осуществляли нагрев с использованием тепловой приставки машины Instron-5565. Далее образец продолжали нагружать с той же скоростью деформации, что и на первом этапе, но уже при повышенной температуре образца, равной температуре нагрева за счет импульсного тока. Эксперименты на всех исследуемых сплавах показали, что зависимость снижения механического напряжения  $\Delta\sigma$  от величины нагрева  $\Delta T$  имеет линейный характер. Аналогичные зависимости получены в экспериментах по пропусканию импульсов электрического тока.

Экспериментальные зависимости аппроксимировали линейной функцией вида  $\Delta\sigma = k\Delta T$ , где  $k$  – коэффициент, показывающий величину сброса напряжения при нагреве на  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ .

Установлено, что в аморфных сплавах на основе кобальта пропускание импульсного тока вызывает больший сброс механического напряжения, чем нагрев в печи. Значения коэффициентов для токового ( $k_1$ ) и печного ( $k_2$ ) нагрева приведены в таблице.

Таким образом, сброс механического напряжения, вызванный пропусканием импульса электрического тока, в аморфных сплавах почти в 1,5 раза больше, чем сброс напряжения при нагреве в печи (рис. 3, *a*). Очевидно, что сброс напряжения в образце обусловлен не только термическим расширением, но и иным механизмом, инициируемым пропусканием импульса электрического

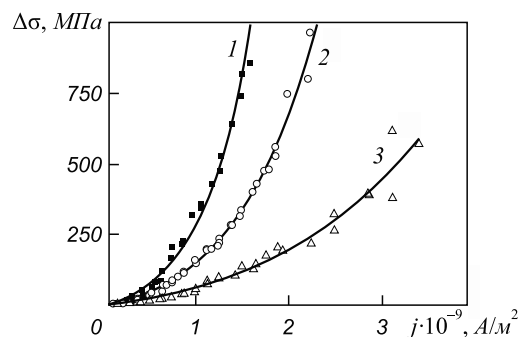


Рис. 2. Зависимость сброса механического напряжения от плотности тока при  $\tau = 5 \text{ мс}$  в сплавах АМАГ-180 (1), АМАГ-172 (2), АМАГ-200 (3)

**Значения коэффициентов нагрева**

Сплав	Коэффициенты		
	$k_1$ , МПа/°С	$k_2$ , МПа/°С	$k_1/k_2$
АМАГ-170	9,33	6,08	1,54
АМАГ-172	8,72	5,50	1,59
АМАГ-179	10,15	5,52	1,84
АМАГ-180	11,94	7,68	1,56
АМАГ-183	8,95	5,42	1,65
АМАГ-186	9,84	6,58	1,65
АМАГ-200	5,85	5,85	1,00

тока. Исключаются также магнестрикционные явления, вызванные пропусканием электрического тока, так как в аморфных сплавах с большим содержанием кобальта величина магнестрикции имеет практически нулевое значение [11].

Для сплава АМАГ-200 величины сбросов механического напряжения, вызванных импульсным током и нагревом в печи, одинаковы (рис. 3, б) при одной и той же температуре, что может быть связано с особенностями строения материала, который находится в более стабильном состоянии по сравнению с АМС по крайней мере при нагреве до температур примерно 100 °С. Следовательно, сброс механического напряжения в этом сплаве можно объяснить только термическим расширением в результате пропускания импульсного тока.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ рентгенограмм образцов сплавов без воздействий и после воздействия импульсами тока, а также образцов, отожженных при различных температурах. Выявлено, что аморфные сплавы на основе кобальта (АМАГ-170 – 186) после серий импульсов электрического тока плотностью  $10^8 - 10^9$  А/м<sup>2</sup> остаются рентгеноаморфными, что может быть связано с начальными этапами обратимых атомных перестроек, к которым рентгеновские методы нечувствительны; в нанокристаллическом сплаве на основе железа (АМАГ-200) после серий импульсов тока с нагревом, не превышающим 100 °С, на дифрактограммах отмечены незначительные изменения, которые могут быть обусловлены частичным снятием закалочных напряжений. При этом снижается предел прочности, но коэффициент термического расширения не изменяется.

**Выводы.** Пропускание импульса электрического тока плотностью до  $4 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup> вызывает обратимый сброс механического напряжения на диаграммах нагружения аморфных металлических сплавов, величина которого определяется не только термическим расширением, но и начинающимися процессами структурной релаксации. В нанокристаллическом сплаве на основе железа критическая плотность импульсного электрического тока, не вызывающая невосстанавливаемый сброс, составляет  $8 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>. Сброс механического напряжения обусловлен только термическим расширением, зависимость его от величины импульсного тока аппроксимируется экс-

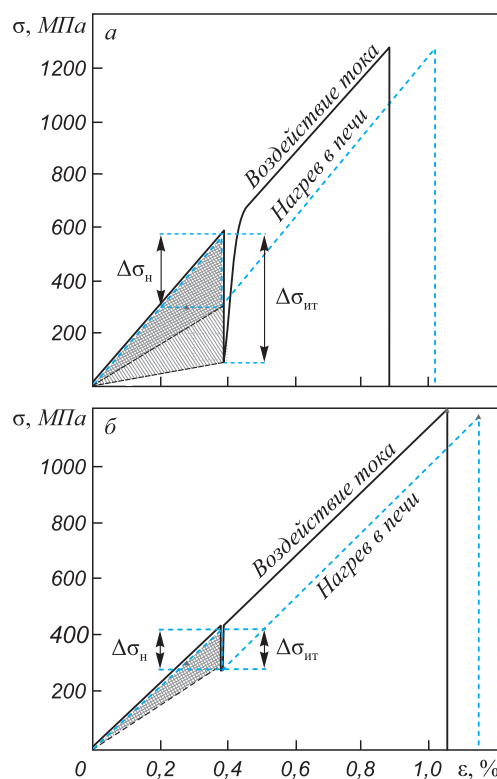


Рис. 3. Сброс механического напряжения в результате пропускания импульсного тока ( $\Delta\sigma_{ит}$ ) и нагрева ( $\Delta\sigma_{нт}$ ) для сплава АМАГ-180 (а) и АМАГ-200 (б)

понентой, числовые коэффициенты определяются элементным составом сплавов.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
2. Гилман Д.Д., Лими Х.Д. Металлические стекла. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.
3. Золотухин И.В. Физические свойства аморфных металлических материалов. – М.: Металлургия, 1986. – 176 с.
4. Механическое поведение аморфных сплавов / А.М. Глезер, И.Е. Пермякова, В.Е. Громов, В.В. Коваленко. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2006. – 416 с.
5. Капустин А.Н., Федоров В.А., Яковлев А.В. // Перспективные материалы. 2007. Т. 1. С. 333 – 337.
6. Яковлев А.В., Капустин А.Н., Федоров В.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2007. Т. 4. № 1. С. 66 – 71.
7. Федоров В.А., Яковлев А.В., Капустин А.Н. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 8 (638). С. 39 – 41.
8. Feodorov V.A., Jakovlev A.V., Kapustin A.N., Vasilieva I.V. // Reviews on Advanced Materials Science. 2009. Vol. 20. № 2. P. 179 – 186.
9. Федоров В.А., Яковлев А.В., Плужникова Т.Н., Капустин А.Н. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2009. Т. 6. № 2. С. 87 – 91.
10. Федоров В.А., Яковлев А.В., Плужникова Т.Н. // Изв. вуз. Физика. 2011. Т. 54. № 9. С. 53 – 58.
11. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.