

14,08

## Многоцикловое электроимпульсное нагружение аморфных сплавов на основе кобальта и железа

© В.А. Федоров, Т.Н. Плужникова, Д.Ю. Федотов, М.В. Бойцова

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,  
Тамбов, Россия

E-mail: fedorov-tsu.tmb@inbox.ru

Поступила в Редакцию 11 мая 2023 г.

В окончательной редакции 14 сентября 2023 г.

Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Исследовано влияние импульсов электрического тока на механические характеристики ленточных аморфных сплавов на основе Co и Fe. Показано, что предел прочности сплавов и количество импульсов до разрушения линейно уменьшаются по мере увеличения плотности тока. Отмечено, что на зависимостях предела прочности материалов  $\sigma$  от относительной деформации  $\varepsilon$  деформируемого образца, находящегося в магнитном поле, созданном пропусканием импульса тока через подобный образец, расположенный параллельно деформируемому, образуются микросбросы механического напряжения. Проявление микросбросов может быть связано с магнитокалорическим эффектом.

**Ключевые слова:** магнитное поле, импульсный ток, прочность.

DOI: 10.61011/FTT.2024.01.56948.5039

### 1. Введение

Ленточные и объемные аморфные металлические сплавы находят широкое применение в различных отраслях промышленности (от авиастроения до медицинских имплантов нового поколения). При этом сплавы подвергаются различным внешним воздействиям, в частности, воздействиям электромагнитных полей — как стационарных, так и переменных [1,2]. Сведения об изменении свойств сплавов в условиях электромагнитных воздействий, а также о механизмах и особенностях их деформирования практически отсутствуют. В связи с изложенным, в настоящей работе проведены исследования по влиянию импульсного электрического тока на деформационное поведение ленточных аморфных сплавов на основе Co и Fe и изменение их механических характеристик.

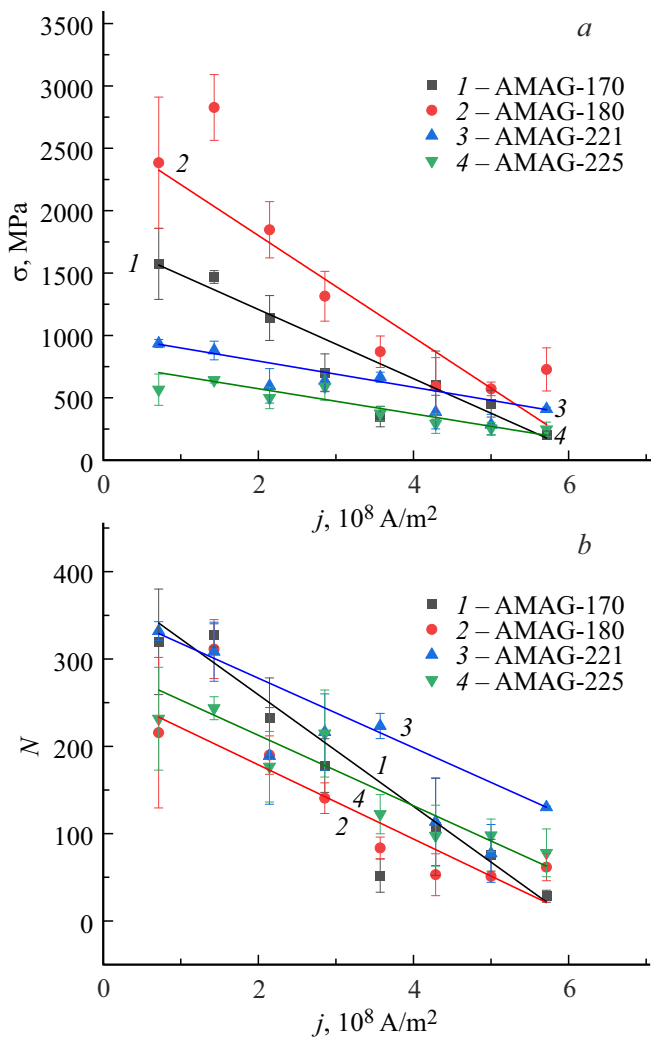
### 2. Эксперимент

В работе исследовали ленточные образцы аморфных магнитомягких сплавов на основе кобальта (АМАГ-170, АМАГ-180) и железа (АМАГ-221, АМАГ-225) [3]. Размеры образцов  $40 \times 3.5 \times 0.02$  mm. Аморфность сплавов контролировали рентгенографически. Образцы подвергали одноосному растяжению на электромеханической машине Instron-5565 со скоростью движения траверсы 0.1 mm/min, при комнатной температуре. Одновременно на образец подавали импульсы электрического тока пилообразной формы с плотностью тока от  $10^8$  до  $6 \cdot 10^8$  A/m<sup>2</sup>. Длительность импульсов составляла  $\tau \approx 250$  ms. Частота следования импульсов — 0.5 Hz. Изменение температуры деформируемого образца измеряли пирометром Testo-845.

В первой части экспериментов образец испытывал одновременное воздействие электрического тока (нагрев за счет джоулева тепла) и механической нагрузки и находился в собственном магнитном поле (пинч-эффект). На зависимости предела прочности материала  $\sigma$  от относительной деформации  $\varepsilon$  наблюдали сброс механических напряжений [3]. Исследовали изменение механических характеристик аморфных металлических сплавов в зависимости от количества подаваемых импульсов электрического тока и от увеличения плотности тока в электрическом импульсе. Для всех сплавов наблюдали линейное снижение предела прочности (рис. 1, *a*) с увеличением плотности тока. Количество импульсов тока, пропущенных через образец до момента разрушения, с увеличением плотности тока также линейно уменьшается (рис. 1, *b*). Значение модуля Юнга при всех указанных режимах изменяется в пределах погрешности измерений, что следует из хода зависимостей  $\sigma(\varepsilon)$ .

Электронная микроскопия показала, что в сплавах при разрушении наблюдается развитая система ветвящихся трещин, образующих ступенчатую поверхность (рис. 2, *a*). При увеличении плотности электрического тока до  $5 \cdot 10^8$  A/m<sup>2</sup> на поверхности образцов вблизи траектории разрушения наблюдали локальные зоны оплавления (рис. 2, *b*), связанные, по-видимому, с дополнительным разогревом дефектов структуры, вызванным собственно разрушением [4]. Микротвердость, измеренная на контактной поверхности образцов, при указанных режимах воздействия электрического тока практически не меняется.

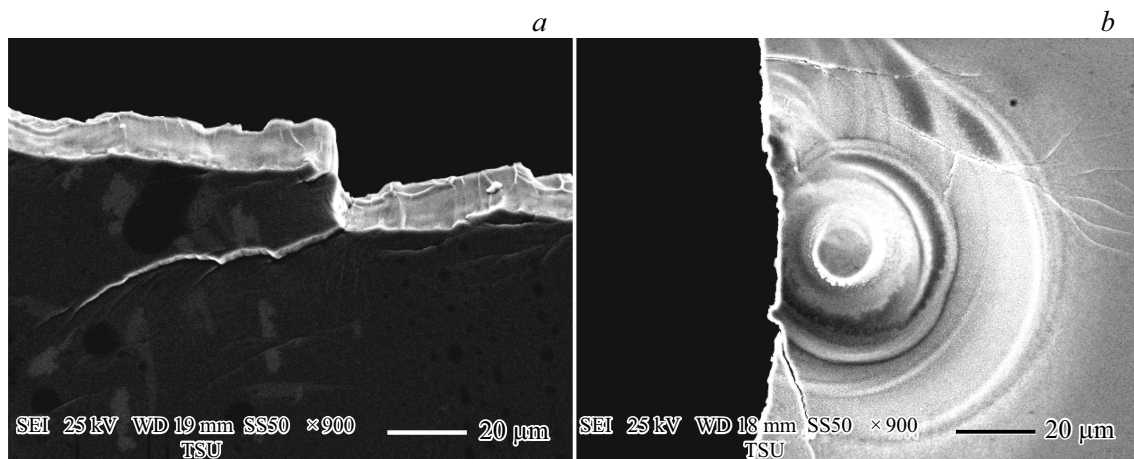
Во второй части работы поставлены эксперименты, в которых образец деформировали без пропускания через него импульсного электрического тока. Импульсы



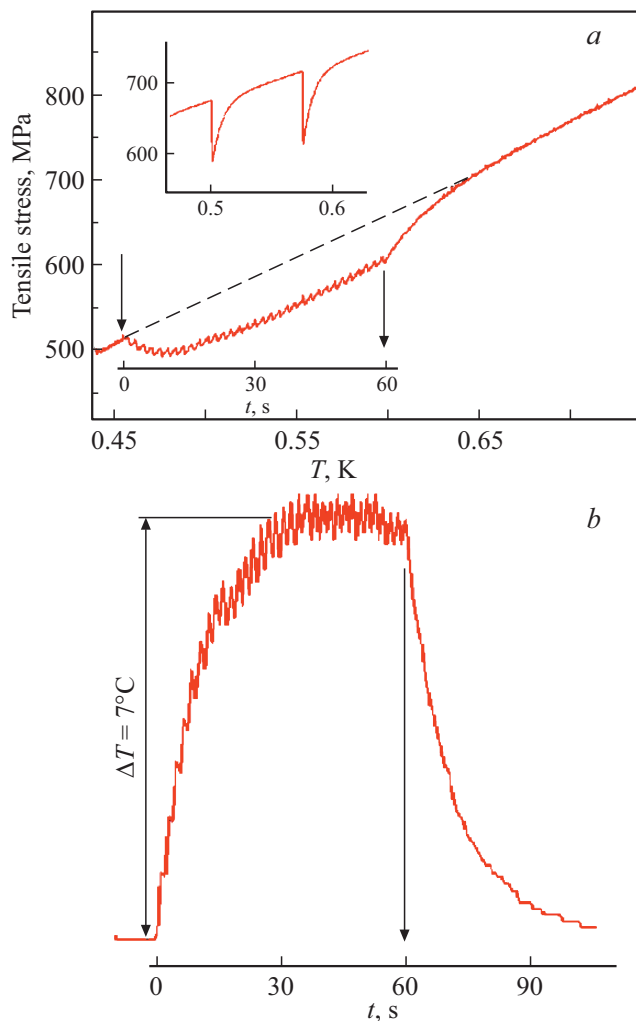
**Рис. 1.** Зависимости от плотности импульсного тока  $j$ :  $a$  — предела прочности материала  $\sigma$  и  $b$  — количества импульсов  $N$  электрического тока до разрушения для сплавов на основе кобальта (АМАГ-170, АМАГ-180) и железа (АМАГ-221, АМАГ-225).

электрического тока пропускали через другой такой же, но не нагруженный образец, расположенный параллельно деформируемому в непосредственной от него близости. Между образцами помещали диэлектрическую теплоизолирующую прокладку толщиной  $\sim 1 \text{ mm}$ , предотвращающую импульсный нагрев деформируемого образца. Таким образом, испытуемый образец находился в магнитном поле, создаваемом пропусканием импульса тока по такому же, но ненагруженному образцу.

Результаты экспериментов представлены на рис. 3. По мере пропуска импульсов электрического тока происходит постепенный нагрев деформируемого образца через теплоизолирующую прокладку. Повышение температуры приводит к постепенному снижению деформирующих напряжений. При повышении температуры на  $\Delta T = 7^\circ\text{C}$  (рис. 3,  $b$ ) снижение напряжений составляет порядка 100 МПа (рис. 3,  $a$ ), тогда как при импульсном нагреве деформируемого образца в момент пропускания по нему импульса тока наблюдается резкий сброс напряжения (рис. 3,  $a$ , вставка), достигающий  $\sim 200 \text{ МПа}$ , при соответствующем повышении температуры на  $\sim 20^\circ\text{C}$ . После прекращения подачи импульсов тока зависимость  $\sigma(\epsilon)$  возвращается к исходному углу наклона. Аналогичное отклонение хода зависимости  $\sigma(\epsilon)$  наблюдали при печном нагреве образцов. Вместе с тем, на фоне снижения деформирующих напряжений на зависимости  $\sigma(\epsilon)$  наблюдались микросбросы механического напряжения величиной порядка 7–8 МПа, соответствующие по времени скачкам температуры деформируемого образца  $0.7\text{--}0.8^\circ\text{C}$  (рис. 3,  $b$ ). Зависимость на рис. 3,  $b$  показывает общее повышение температуры деформируемого образца за счет тепла, выделяемого в образце, через который пропускали импульсы электрического тока. Нагрев происходит плавно, как и последующее охлаждение после прекращения подачи импульсов. Наблюдаемые микросбросы механического напряжения на протяжении всей зависимости постоянны по величине, что может быть связано с некоторым фактором, также постоянным



**Рис. 2.**  $a$  — фрагмент образования ступеней и ветвления трещины при разрушении сплава АМАГ-225;  $b$  — область локального оплавления вблизи поверхности разрушения сплава АМАГ-186. Плотность тока  $5.7 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ .



**Рис. 3.** Образцы АМАГ-186, частота импульсов 0.5 Hz, плотность тока  $5 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ : *a* — диаграмма нагружения, на вставке — диаграмма нагружения для образца, по которому пропускается импульс тока; *b* — изменение температуры деформируемого образца. Стрелками отмечено начало и окончание подачи импульсов тока.

по величине. Таким фактором может быть магнитное поле, генерируемое образцом, по которому пропускается импульс электрического тока. В этом случае возможно проявление магнитокалорического эффекта [5]. Дополнительный импульсный нагрев приводит к дополнительным микросбросам механических напряжений. Рентгенографически показано, что после пропускания импульсов электрического тока аморфное состояние сплавов сохраняется.

### 3. Выводы

1. Пропускание импульсов электрического тока через ленточные аморфные сплавы на основе Co и Fe приводит к линейному снижению предела прочности и числа импульсов до разрушения в зависимости от величины

плотности тока. Это связано с выделением джоулева тепла, снижающего закалочные напряжения.

2. Нагружение образцов, находящихся в импульсном магнитном поле, приводит к образованию на зависимости  $\sigma(\varepsilon)$  микросбросов механических напряжений, появление которых может быть обусловлено дополнительным нагревом за счет магнитокалорического эффекта.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (номер проекта 22-22-00226). Результаты получены с использованием оснащения Центра коллективного пользования научным оборудованием ТГУ им. Г.Р. Державина.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] P. Yiu, C.H. Hsueh, C.H. Shek. *J. Alloys. Compounds* **658**, 795 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.033>
- [2] В.В. Столяров. *Зав. лаборатория. Диагностика материалов* **81**, 10, 62 (2015).
- [3] V.A. Fedorov, T.N. Pluzhnikova, A.D. Berezner. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1115**, 5, 052016 (2018). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/5/052016>
- [4] G.Y. Wang, P.K. Liaw, W.H. Peter, B. Yang, M. Freels, Y. Yokoyama, M.L. Benson, B.A. Green, T.A. Saleh, R.L. McDaniels, R.V. Steward, R.A. Buchanan, C.T. Liu, C.R. Brooks. *Intermetallics* **12**, 10–11, 1219 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2004.04.038>
- [5] Е.В. Дворецкая, В.Л. Сидоров, О.В. Коплак, Д.В. Королев, В.П. Пискорский, Р.А. Валеев, Р.Б. Моргунов. *ФТТ* **64**, 8, 984 (2022). <https://doi.org/10.21883/FTT.2022.08.52694.373> [E.V. Dvorcekaia, V.L. Sidorov, O.V. Koplak, D.V. Korolev, V.P. Piskorsky, R.A. Valeev, R.B. Morgunov. *Phys. Solid State* **64**, 8, 989 (2022). <https://doi.org/10.21883/PSS.2022.08.54615.373>].

Редактор Е.В. Толстякова