

## Влияние магнитоимпульсной обработки на магнитные свойства аморфного твёрдого раствора $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$

*М. Н. Шипко, В. В. Коровушкин, А. Г. Савченко, М. А. Степович,  
Н. Д. Бахтеева, Е. С. Савченко, Е. В. Тодорова*

*Исследовано влияние импульсов слабого магнитного поля на аморфный сплав  $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$ , полученный методом спиннингования в виде фольги толщиной 20 мкм. Изучены следующие гистерезисные характеристики аморфного твёрдого раствора до и после магнитоимпульсной обработки: удельная намагниченность насыщения, удельная остаточная намагниченность, коэрцитивная сила и площади петель гистерезиса. Вид и параметры петель магнитного гистерезиса указывают на наличие в сплаве магнитоупорядоченных областей – кластеров, а специфическая форма петель магнитного гистерезиса сплава указывает также на наличие в аморфной фольге наведенной магнитной анизотропии. После магнитоимпульсной обработки лент аморфного сплава  $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$  в результате протекания релаксационных процессов (увеличения степени химического и топологического порядка, снижения степени наведенной магнитной анизотропии) наблюдается существенное изменение значений всех структурно-чувствительных гистерезисных характеристик, в том числе более чем 6-кратное увеличение удельной намагниченности насыщения. Полученные результаты указывают на возможность использования магнитоимпульсной обработки аморфных сплавов для управления их магнитными свойствами.*

*Ключевые слова:* магнитоимпульсная обработка, аморфный твёрдый раствор, упорядочение, магнитные свойства, анизотропия.

**Ссылка:** Шипко М. Н., Коровушкин В. В., Савченко А. Г., Степович М. А., Бахтеева Н. Д., Савченко Е. С., Тодорова Е. В. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 81.

**Reference:** M. N. Shipko, V. V. Korovushkin, A. G. Savchenko, M. A. Stepovich, N. D. Bakhteeva, E. S. Savchenko, and E. V. Todorova, Prikl. Fiz., No. 3, 81 (2019).

### Введение

В последние годы интерес к аморфным сплавам заметно увеличился в связи с воз-

можностью практического использования их уникальных свойств в устройствах космической, авиационной и радиоэлектронной тех-

---

**Шипко Михаил Николаевич**<sup>1</sup>, профессор, д.т.н.  
**Коровушкин Владимир Васильевич**<sup>2</sup>, профессор,  
д.г.-м.н.

**Савченко Александр Григорьевич**<sup>2</sup>, зав. каф., к.ф.-м.н.  
**Степович Михаил Адольфович**<sup>3</sup>, профессор, д.ф.-м.н.  
**Бахтеева Наталия Дмитриевна**<sup>4</sup>, в.н.с., д.т.н.  
**Савченко Елена Сергеевна**<sup>2</sup>, н.с., к.т.н.

**Тодорова Елена Викторовна**<sup>4</sup>, с.н.с., к.т.н.

<sup>1</sup> Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина.

Россия, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.  
Тел. +7(910) 668-75-65. E-mail: michael-1946@mail.ru

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

---

Россия, 119049, Москва, Ленинский проспект, 4.

<sup>3</sup> Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского.

Россия, 248023, г. Калуга, ул. Степана Разина, 26.

<sup>4</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН.

Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, 49.  
Тел.: +7(910) 403-08-39, +7(499) 135-94-84.

*Статья поступила в редакцию 22 марта 2019 г.*

---

© Шипко М. Н., Коровушкин В. В., Савченко А. Г., Степович М. А., Бахтеева Н. Д., Савченко Е. С., Тодорова Е. В., 2019

ники. По сравнению с кристаллическими аналогами, аморфные сплавы путём изменения их состава или в результате различных физико-химических воздействий позволяют получать материалы с более разнообразными свойствами. Посредством воздействий на аморфные материалы можно влиять, например, на ближний порядок расположения атомов в сплавах, и как следствие, на их электромагнитные свойства [1].

Изменение ближнего порядка в таких сплавах может происходить в результате низкоэнергетических воздействий, в результате которых изменяется локальный позиционный порядок в расположении атомов и появляются атомы с координационным числом, отличающимся от его среднего значения для данной аморфной структуры. Эти неоднородности способствуют локальным структурным превращениям с относительно низким потенциальным барьером перегруппировки атомов. Следовательно, под действием какого-либо низкоэнергетического воздействия (например, слабого магнитного поля [2–4]) возможен переход от одной локальной конфигурации расположения атомов к другой, что будет влиять на электромагнитные свойства материала [5].

В настоящей работе изучено влияние импульсов слабого магнитного поля на маг-

нитные свойства аморфного твёрдого раствора  $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$ .

### Методика эксперимента

Аморфный сплав  $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$  в виде фольги толщиной 20 мкм получали методом спиннингования. Магнитные свойства сплавов изучали с использованием вибрационного магнитометра VSM-250 в магнитном поле напряжённостью до 20 кЭ при комнатной температуре.

Магнитоимпульсную обработку (МИО) сплавов проводили при комнатной температуре на установке МИУ(S) при следующих параметрах импульсов: длительность импульса 0,1–0,5 с, длительность паузы между импульсами 1–5 с, число импульсов 0–30 [6, 7].

### Результаты исследований

Гистерезисные характеристики аморфного твёрдого раствора  $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$  до и после МИО, а именно, удельная намагничённость в поле 20 кЭ (далее – удельная намагничённость насыщения  $\sigma_s$ ), удельная остаточная намагничённость  $\sigma_r$ , коэрцитивная сила  $H_c$  и площади петель гистерезиса  $S$  – приведены в таблице, а соответствующие петли магнитного гистерезиса, полученные с использованием вибрационного магнитометра – на рисунке.

Таблица

Гистерезисные характеристики аморфного сплава  $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$  до и после магнитоимпульсной обработки

Количество импульсов	Намагничённость насыщения $\sigma_s$ , (А м <sup>2</sup> /кг)	Остаточная намагничённость $\sigma_r$ , (А м <sup>2</sup> /кг)	Коэрцитивная сила $H_c$ , кА/м	Площадь петли $S$ , (А м <sup>2</sup> /кг)
0	3,6	1,4	110	300
10	2,3	0,5	34	110
30	22,7	4,4	9	215

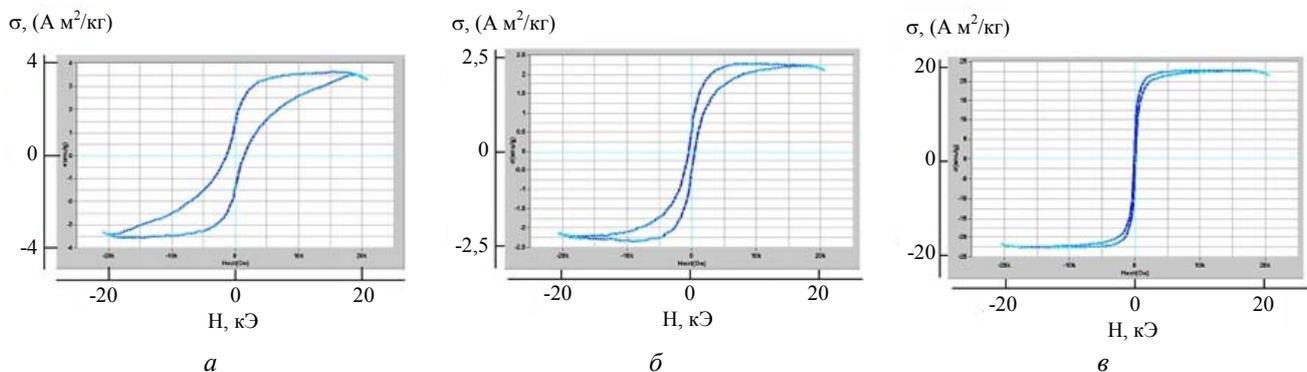


Рисунок. Петли магнитного гистерезиса аморфного сплава  $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$ , полученные с использованием вибрационного магнитометра, в исходном состоянии (а) и после магнитоимпульсной обработки 10 (б) и 30 (в) импульсами.

## Обсуждение результатов

Вид и параметры петель магнитного гистерезиса указывают на наличие в сплаве магнитоупорядоченных областей – кластеров. Результирующие магнитные моменты таких кластеров ввиду непостоянства их химического состава, количества вакансий и конфигурации связей между атомами сильно разнятся [1]. В частности, этот разброс обусловлен существенными различиями вида и интенсивности интегралов обменного взаимодействия и, как следствие, различной ориентировкой магнитных моментов атомов Fe и Ni в таких кластерах – типа микромагнетиков или спинового стекла. При этом магнитные моменты атомов Fe и Ni, будучи связанными обменными взаимодействиями, в зависимости от расстояния между ними, состава и конфигурации их окружения, могут образовывать ферро-, ферри- или антиферромагнитные структуры [8].

Специфическая форма петель магнитного гистерезиса сплава указывает также на наличие в аморфной фольге наведенной магнитной анизотропии. В частности, появление перетяжки на петле магнитного гистерезиса связано с проявлением в сплаве наведенной магнитной анизотропии, которая могла возникнуть как в результате быстрого охлаждения материала до комнатной температуры [9, 10], так и вследствие анизотропии в распределении ориентировок результирующих магнитных моментов кластеров.

В результате МИО аморфной фольги сплава  $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$  происходит уменьшение магнитоупругой энергии [10] и, как следствие, снижение уровня наведенной анизотропии, что отчетливо прослеживается на изменении формы и параметров соответствующих петель магнитного гистерезиса.

В слабых магнитных полях намагничивание сплава определяется процессами когерентного вращения магнитных моментов кластеров с повышенным содержанием атомов Fe и Ni. Для крупных кластеров или кластеров с низким содержанием магнитных атомов Fe и Ni более выгодным представляется их перенамагничивание путем вращения магнитных моментов отдельных атомов [1]. Это предположение подтверждается наблюдающимися изменениями коэрцитивной силы и удельной остаточной намагниченности, величина кото-

рых зависит от соотношения количества малых и крупных кластеров, их магнитных моментов, а также степени наведенной магнитной анизотропии.

Из результатов, приведённых в таблице, видно, что после МИО изменяются не только коэрцитивная сила и удельная остаточная намагниченность, но также и удельная намагниченность насыщения, а также площадь петель магнитного гистерезиса. Эти изменения убедительно свидетельствуют об изменениях в процессе МИО структурного состояния сплава, электронной структуры магнитных атомов, а также уровня наведенной анизотропии.

Уменьшение коэрцитивной силы  $H_c$ , относительной удельной остаточной намагниченности (отношения  $\sigma_r/\sigma_s$ ) и площади  $S$  петель магнитного гистерезиса аморфного сплава  $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$  после его МИО можно связать с локальным упорядочением сплава (уменьшением степени несовершенства его структуры) и уменьшением уровня внутренних напряжений, следствием чего является снижение степени макроскопической и локальной наведенной магнитной анизотропии.

Резкое увеличение удельной намагниченности насыщения  $\sigma_s$  сплава после МИО при обработке 30 импульсами магнитного поля может быть обусловлено увеличением магнитных моментов атомов Fe и исчезновением антиферромагнитных конфигураций в их ориентировке, что вполне ожидаемо в случае увеличения степени химического и топологического порядка в объемной части аморфной фольги.

## Заключение

После магнитоимпульсной обработки лент аморфного сплава  $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$  в результате протекания релаксационных процессов (увеличения степени химического и топологического порядка, снижения степени наведенной магнитной анизотропии) наблюдается существенное изменение значений структурно-чувствительных гистерезисных характеристик ( $H_c$ ,  $\sigma_r$ ,  $A$ ) и более чем 6-кратное увеличение удельной намагниченности насыщения в поле 20 кЭ ( $\sigma_s$ ). Полученные результаты указывают на возможность использования магнитоимпульсной обработки аморфных

сплавов для управления их магнитными свойствами.

*Исследования выполнены по государственному заданию № 075-00746-19-00, а также при частичной финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-03-00271), гранта РФФИ и правительства Ивановской области (проект № 18-43-370012) и гранта РФФИ и правительства Калужской области (проект № 18-41-400001).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кекало И. Б. Атомная структура аморфных сплавов и ее эволюция. – М.: Изд-во «Учеба», МИСиС, 2006.
2. Шипко М. Н., Тихонов А. И., Степович М. А., Коровушкин В. В., Савченко Е. С., Корнев И. А. // Прикладная физика. 2018. № 4. С. 94.

3. Шипко М. Н., Тихонов А. И., Степович М. А., Вирюс А. А., Каминская Т. П., Коровушкин В. В., Савченко Е. С., Еремин И. В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 1090.
4. Шипко М. Н., Коровушкин В. В., Костишин В. Г., Исаев И. М., Степович М. А., Савченко Е. С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 2. С. 232.
5. Палатник Л. С., Черемской П. Г., Лукашенко Л. И., Роценко С. Т., Авраменко Б. А., Муровцев Л. Г., Утевская О. Л. // ФММ. 1985. Т. 60. Вып. 4. С. 695.
6. Староверов Б. А., Степович М. А., Шипко М. Н. // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 8. С. 1.
7. Степович М. А., Шипко М. Н., Коровушкин В. В., Костишин В. Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 8. С. 1152.
8. Скулкина Н. А., Иванов О. А., Павлова И. О., Минина О. А. // ФММ. 2013. Т. 114. № 5. С. 411.
9. Скаков Ю. А., Крапошин В. С. Затвердевание в условиях сверхбыстрого охлаждения и фазовые превращения при нагреве металлических стекол / В. кн.: Итоги науки и техники. Сер. Металловедение и термическая обработка. – М.: ВИНТИ, 1980. Т. 13. С. 3–78.
10. Yamamoto R., Matsuoka H., Doyama M. // Phys. Stat. Sol. (a). 1978. Vol. 45. No. 1. P. 305.

PACS: 75.50.Kj;75.50.Bb;81.40.Rs

## The effect of magnetic pulse treatment on the magnetic properties of amorphous solid solution $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$

*M. N. Shipko<sup>1</sup>, V. V. Korovushkin<sup>2</sup>, A. G. Savchenko<sup>2</sup>, M. A. Stepovich<sup>3</sup>, N. D. Bakhteeva<sup>4</sup>, E. S. Savchenko<sup>2</sup>, and E. V. Todorova<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Lenin Ivanovo State Power Engineering University  
34 Rabfakovskaya st., Ivanovo, 153003, Russia  
E-mail: michael-1946@mail.ru

<sup>2</sup> National University of Science and Technology "MISiS"  
4 Leninsky Ave., Moscow, 119049, Russia  
E-mail: krvsch@mail.ru, algsav@gmail.com, savchenkoelena@ya.ru

<sup>3</sup> Tsiolkovsky Kaluga State University  
26 Stepan Razin st., Kaluga, 248023, Russia  
E-mail: m.stepovich@rambler.ru

<sup>4</sup> Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science RAS  
49 Leninsky Ave., Moscow, GSP-1, 119991, Russia  
E-mail: nbach@imet.ac.ru, elena.panfilova10@yandex.ru

Received March 22, 2019

*The effect of weak magnetic field pulses on an amorphous  $Al_{85}Fe_7Ni_5La_3$  alloy obtained by spinning in the form of a foil 20  $\mu\text{m}$  thick is investigated. The following hysteresis characteris-*

*tics of amorphous solid solution before and after magnetic pulse treatment were studied: specific saturation magnetization, specific residual magnetization, coercive force, and area of hysteresis loops. The type and parameters of magnetic hysteresis loops indicate the presence of magnetically ordered regions – clusters in the alloy, and the specific shape of the magnetic hysteresis loops of the alloy also indicates the presence of induced magnetic anisotropy in the amorphous foil. After magnetic pulse processing of amorphous  $Al_{85}Fe_7Ni_3La_3$  alloy ribbons as a result of relaxation processes (increasing the degree of chemical and topological order, reducing the degree of induced magnetic anisotropy), there is a significant change in the values of all structurally sensitive hysteresis characteristics, including more than 6-fold increase in the saturation magnetization. The results indicate that it is possible to use magnetic pulse treatment of amorphous alloys to control their magnetic properties.*

*Keywords:* magnetic pulse treatment, amorphous solid solution, ordering, magnetic properties, anisotropy.

## REFERENCES

1. B. Kekalo, *Atomic structure of amorphous alloys and its evolution* (Izd. Ucheba, Moscow, 2006) [in Russian].
2. M. N. Shipko, A. I. Tikhonov, M. A. Stepovich, V. V. Korovushkin, E. S. Savchenko, and I. A. Kornev, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 94 (2018).
3. M. N. Shipko, A. I. Tikhonov, M. A. Stepovich, A. A. Viryus, T. P. Kaminskaya, V. V. Korovushkin, E. S. Savchenko, and I. V. Eremin, *Bul. Rus. Acad. Sci.: Physics* **82** (8), 988 (2018).
4. M. N. Shipko, V. V. Korovushkin, V. G. Kostishin, I. M. Isaev, M. A. Stepovich, and E. S. Savchenko, *Bul. Rus. Acad. Sci.: Physics* **82** (2), 203 (2018).
5. L. S. Palatnik, P. G. Cheremskoy, L. I. Lukashenko, S. T. Roshchenko, B. A. Avramenko, L. G. Murovtsev, and O. L. Utevskeya. *Fizika Metallov i Metallovedeniye* **60** (4), 695 (1985).
6. B. A. Staroverov, M. A. Stepovich, and M. N. Shipko, *Promyshlennyye ASU i Kontrollery*, No. 8, 1 (2011).
7. M. A. Stepovich, M. N. Shipko, V. V. Korovushkin, and V. G. Kostishin, *Bul. Rus. Acad. Sci.: Physics* **81** (8), 1152 (2017).
8. N. A. Skulkina, O. A. Ivanov, I. O. Pavlova, and O. A. Minina, *The Physics of Metals and Metallography* **114** (5), 375 (2013).
9. Yu. A. Skakov and V. S. Kraposhin, *Hardening under conditions of ultrafast cooling and phase transformations during heating of metallic glasses* (Results of Science and Technology. Ser. Metal Science and Heat Treatment, **13**, 3, VINITI, Moscow, 1980).
10. R. Yamamoto, H. Matsuoka, and M. Doyama, *Phys. Stat. Sol. (a)* **45** (1), 305 (1978).