

МИРЭА – Российский Технологический Университет

## XXV Международная конференция

**Н**овое в  
**М**агнетизме и  
**М**агнитных  
**М**атериалах



# СБОРНИК ТРУДОВ



1 – 6 июля 2024 года

Москва

**УДК 537.612.3**

**ББК 222.234**

**Си34**

**Си34**      **Новое в магнетизме и магнитных материалах. Сборник трудов XXV  
Международной конференции 1 – 5 июля 2024 г. – Москва – 2024 – 988 с.**

**ISBN 978-5-4465-1869-2**

## ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

МИРЭА – Российский технологический университет.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет.

Подсекция «Физика магнитных пленок и малых частиц» секции «Магнетизм» Научного Совета РАН «Физика конденсированных сред».

Магнитное Общество России (МАГО).

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

**Председатель:** Сигов Александр Сергеевич

**Заместитель председателя:** Юрасов Алексей Николаевич

**Члены Организационного комитета:** Грановский Александр Борисович, Мишина Елена Дмитриевна, Перов Николай Сергеевич, Пятаков Александр Павлович, Фетисов Леонид Юрьевич, Гладышев Игорь Васильевич, Яшин Максим Михайлович.

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

**Председатель:** Пятаков Александр Павлович

**Заместитель председателя:** Юрасов Алексей Николаевич

**Члены программного комитета:**

Бибенин Н.Г.	Исхаков Р.С.	Марченков В.В.	Прудников В.Н.	Усов Н.А.
Белотелов В.И.	Калинин Ю.Е.	Муртазаев А.К.	Розанов К.Н.	Устинов В.В.
Ведяев А.В.	Кокшаров Ю.А.	Мухин А. А.	Родионова В.В.	Фраерман А.А.
Васильев А.Н.	Курляндская Г.В.	Никитин С.А.	Рудой Ю.Г.	Фетисов Ю.К.
Ганьшина Е.А.	Лилеев А.С.	Овчинников С.Г.	Русаков В.С.	Шавров В.Г.
Гиппиус А.А.	Логунов М.В.	Памятных Л.А.	Сапожников М.В.	Шалыгина Е.Е.
Глушков В.В.	Локк Э.Г.	Писарев Р.В.	Смирнов Б.М.	Шапаева Т.Б.
Губин С.П.	Лукашева Е.В.	Покатилов В.С.	Сухоруков Ю.П.	
Звездин А.К.	Любутин И.С.	Поляков П.А.		

## СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

- 1. Новые магнитные и родственные им материалы: синтез и физические свойства.**  
**Преподавание по разделам «Магнетизм» и «Магнитные материалы» в высшей школе**  
Председатели: Перов Н.С., Прудников В.Н. и Родионова В.В.
- 2. Процессы намагничивания и перемгничивания**  
Председатели: Чеченин Н.Г. и Пятаков А.П.
- 3. Микромагнетизм и доменная структура**  
Председатели: Звездин К.А. и Пятаков А.П.
- 4. Динамические процессы в магнетиках**  
Председатель: Белотелов В.И.
- 5. Спиновый транспорт и кинетические эффекты в магнетиках.**  
**Элементарные возбуждения и волновые процессы в магнетиках**  
Председатели: Грановский А.Б., Юрасов А.Н., Рыльков В.В.
- 6. Резонансные явления в магнетиках**  
Председатели: Дровосеков А.Б., Сырьев Н.Е., Мухин А.А.
- 7. Магнитные фазовые переходы и критические явления**  
Председатели: Муртазаев А.К. и Успенская Л.С.
- 8. Магнитные пленки и многослойные структуры**  
Председатели: Калинин Ю.Е. и Юрасов А.Н.
- 9. Магнитные наноструктуры. Малые магнитные частицы**  
Председатели: Сапожников М.В., Киселева Т.Ю. и Юрасов А.Н.
- 10. Магнитооптика и фотомагнетизм**  
Председатели: Шалыгина Е.Е., Шапаева Т.Б. и Ганьшина Е.А.
- 11а. Магнитоэлектрические явления в композитных структурах**  
Председатели: Фетисов Ю.К. и Фетисов Л.Ю.
- 11б. Магнитоэлектрические явления: кристаллы и однофазные материалы**  
Председатели: Пятаков А.П. и Гареева З.В.
- 12. Магнитоакустика и магнитоупругие взаимодействия**  
Председатели: Котов Л.Н. и Власов В.С.

УДК 537.622

## Магнитная структура и гистерезисные характеристики сплава с эффектом памяти формы $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$

**Харитонский П.В.**, д.ф.-м.н., в.н.с., **Николаев В.И.**, к.ф.-м.н., зав. лаб.,  
**Крымов В.М.**, к.ф.-м.н., с.н.с.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

**Сергиенко Е.С.**

к.ф.-м.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет

**Гареев К.Г.**

к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Ралин А.Ю.**

к.ф.-м.н., доцент, Дальневосточный федеральный университет

**Аннотация.** Исследованы магнитные свойства сплава  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  с эффектом памяти формы. Показано влияние особенностей кристаллической структуры на параметры магнитного гистерезиса. Для сплава  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ , магнитное состояние которого является многодоменным, предложен подход к оценке гистерезисных характеристик на основе модели магнитоэстатически взаимодействующих однодоменных частиц с эффективной спонтанной намагниченностью.

**Ключевые слова:** сплав с эффектом памяти формы, двойникование, магнитные домены, магнитный гистерезис, намагниченность, коэрцитивность, магнитоэстатическое взаимодействие

## Magnetic structure and hysteresis characteristics of shape memory alloy $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$

**Kharitonskii P.V.**, Dr. Sci., lead. res., **Nikolaev V.I.**, Ph. D., head of lab.,  
**Krymov V.M.**, Ph. D., senior res.

Ioffe Institute

**Sergienko E.S.**, Ph. D., assoc. prof.

Saint Petersburg University

**Gareev K.G.**, Ph. D., assoc. prof.

Saint Petersburg Electrotechnical University

**Ralin A.Yu.**, Ph. D., assoc. prof.

Far Eastern Federal University

**Annotation.** The magnetic properties of the shape memory alloy  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  have been studied. The influence of features of the crystal structure on the parameters of magnetic hysteresis is shown. For  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  alloy, the magnetic state of which is multi-domain, an approach to estimating the hysteresis characteristics is proposed based on a model of magnetostatically interacting single-domain particles with effective spontaneous magnetization.

**Keywords:** shape memory alloy, twinning, magnetic domains, magnetic hysteresis, magnetization, coercivity, magnetostatic interaction

К одной из систем, на основе которых возможно получение ферромагнитных сплавов Гейслера с эффектом памяти формы (ФСПФ), относится Ni–Fe–Ga–Co. Некоторые сплавы, относящиеся к данной системе, например,  $Ni_{55-x}Ga_{27}Fe_{18}Co_x$  [1],  $Ni_{52}Fe_{17}Ga_{27}Co_4$  [2],  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  [3] характеризуются сравнительно высокими температурами мартенситного превращения и точки Кюри, которые могут быть изменены за счет варьирования состава и условий термообработки с удельным магнитным моментом, достигающим 40–90 А·м<sup>2</sup>/кг [4–6]. Одной из важных решаемых задач в области исследования ФСПФ является снижение управляющего магнитного поля с ~1 до ~0,1 Тл [7], что напрямую связано с магнитными характеристиками сплава.

Целью настоящей работы являлось исследование магнитных свойств сплава Ni–Fe–Ga–Co с эффектом памяти формы и оценка взаимосвязи кристаллической структуры и магнитного состояния с параметрами магнитного гистерезиса. Теоретический расчет гистерезисных характеристик сплава проводился на основе микромагнитной модели магнитостатически взаимодействующих однодоменных частиц с эффективной спонтанной намагниченностью [8].

Исследуемый кристалл сплава  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  в форме цилиндра диаметром 6 мм и высотой 10 мм был выращен методом Чохральского вдоль направления [100] при скорости вытягивания 1 мм/мин [3]. Образец был отожжен при температуре 1150 °С в течение 1 ч в аргоновой атмосфере с последующей закалкой в воде. Для проведения исследований состава, морфологии поверхности и магнитных свойств использовался диск диаметром 6 мм и толщиной 0,9 мм, полученный методом искровой резки из первоначального образца.

Микроскопические исследования проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа S-3400N (Hitachi, Япония) с аналитической приставкой рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Петля магнитного гистерезиса и кривая разрушения остаточной намагниченности насыщения в поле противоположного направления были построены с помощью вибрационного магнитометра LakeShore 7410 (Lake Shore Cryotronics Inc., США) при температуре 295 К.

Элементный состав, полученный методом РСМА, представлен в таблице 1. Показано, что атомарный состав образца соответствует заданному ( $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ ). Ранее для этого образца проводились исследования калориметрических и механических характеристик [3].

Таблица 1. Элементный состав образца сплава  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ , полученный методом РСМА

Химический элемент	Атомная доля, %
Железо	18±1
Кобальт	6±1
Никель	50±1
Галлий	26±1

Экспериментальные кривые магнитного гистерезиса с центральной частью и кривая разрушения остаточной намагниченности насыщения приведены на рисунке 1. Значения намагниченности насыщения  $M_s$ , остаточной намагниченности  $M_{rs}$ , коэрцитивной силы  $H_c$  и коэрцитивной силы по остаточной намагниченности  $H_{cr}$  приведены в таблице 2.

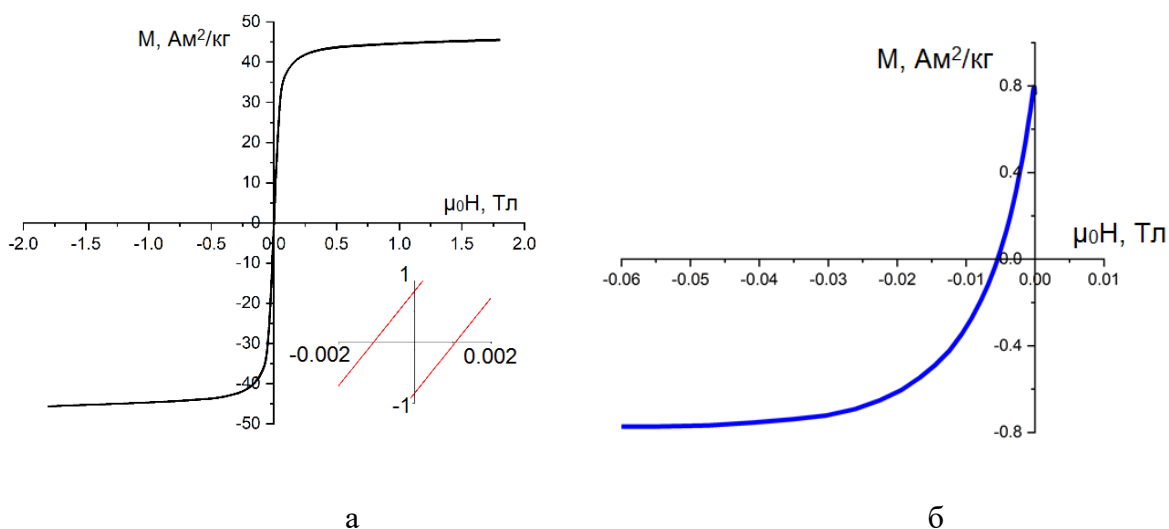


Рис. 1. Петля гистерезиса с центральной частью (а) и кривая разрушения остаточной намагниченности насыщения  $M_{rs}$  (б) образца сплава  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$

Таблица 2. Параметры гистерезиса образца сплава  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  при температуре 295 K

$\mu_0 H_c$ , мТл	$\mu_0 H_{cr}$ , мТл	$M_s$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$M_{rs}$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$H_{cr}/H_c$	$M_{rs}/M_s$
1,10	5,80	45,00	0,84	5,27	0,02

Анализ магнитных свойств образца проводился на основе подходов микромагнетизма и магнитной гранулометрии (см., например, [8]). Магнитное состояние образцов на основе системы Ni–Fe–Ga–Co, подобных изученному сплаву, исследовалось методом керровской микроскопии [2, 9]. Такие образцы являются многодоменными и содержат большое количество полосовых доменов с характерной шириной в диапазоне порядка 10 и более микрометров и значительно более тонкими доменными стенками, а также пересекающимися магнитными доменами поперечными полосами двойникования (см., например [2]). На наш взгляд в части кристаллических и магнитных свойств эти области не являются однородными. То есть внутри этих полосовых «доменов» можно выделить области размером порядка 10 мкм и при отсутствии внешнего поля считать их отдельными магнитостатически взаимодействующими частицами с эффективной спонтанной намагниченностью  $I_{rs\,eff}$ . При этом вкладом в остаточную намагниченность насыщения образца  $M_{rs}$ , вносимым тонкими доменными стенками, можно пренебречь в рамках используемой модели магнитостатически взаимодействующих однодоменных частиц с эффективной спонтанной намагниченностью [8].

Низкое значение коэрцитивной силы  $H_c$  (1,1 мТл) позволяет предположить возможность использования магнитных полей менее 0,1 Тл для управления деформацией памяти формы в ФСПФ. Теоретическая оценка спонтанных намагниченностей  $I_s\,eff$  (порядка 318 кА/м) и  $I_{rs\,eff}$  (порядка 30–60 кА/м) в рамках примененной модели позволяет сделать следующие выводы. Сплав  $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$  имеет спонтанную намагниченность меньше, чем у чистого никеля (510 кА/м), что может объясняться особенностями кристаллической структуры (двойникование и др.). Значение  $I_{rs\,eff}$  (в нулевом внешнем поле) может быть обусловлено восстановлением многодоменной структуры, наличием вихревых образований и доменных стенок.

*Благодарности.* Работы выполнены с использованием оборудования ресурсного центра «Инновационные технологии композитных наноматериалов» Научного парка СПбГУ.

#### Список использованных источников:

1. Imano Y., Omori T., Oikawa K., Sutou Y., Kainuma R., Ishida K. Martensitic and magnetic transformations of Ni–Ga–Fe–Co ferromagnetic shape memory alloys // Mater. Sci. Eng. A. – 2006. – V. 438–440. – P. 970–973.
2. Hu Q., Yang L., Zhou Z., Huang Y., Li J., Li J. Orientation Relationship Between Magnetic Domains and Twins in Ni<sub>52</sub>Fe<sub>17</sub>Ga<sub>27</sub>Co<sub>4</sub> Magnetic Shape Memory Alloy // Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci. – 2017. – V. 48. – P. 2675–2681.
3. Nikolaev V.I., Stepanov S.I., Yakushev P.N., Krymov V.M., Kustov S.B. Burst-like Shape Recovery and Caloric Effects in Ni–Fe–Ga–Co Single Crystalline Shape Memory Alloys // Intermetallics. – 2020. – V. 119. – Article 106709.
4. Zheng H., Xia M., Liu J., Huang Y., Li J. Martensitic Transformation of (Ni<sub>55.3</sub>Fe<sub>17.6</sub>Ga<sub>27.1</sub>)<sub>100-x</sub>Co<sub>x</sub> Magnetic Shape Memory Alloys // Acta Mater. – 2005. – V. 53. – P. 5125–5129.
5. Liu J., Scheerbaum N., Gutfleisch O. Comparative Study of Structural and Magnetic Properties of Bulk and Powder Ni<sub>52</sub>Fe<sub>17</sub>Ga<sub>27</sub>Co<sub>4</sub> Magnetic Shape Memory Alloy // IEEE Trans. Magn. – 2008. – V. 44. – P. 3025–3027.
6. Liu J., Scheerbaum N., Hinz D., Gutfleisch O. Martensitic Transformation and Magnetic Properties in Ni-Fe-Ga-Co Magnetic Shape Memory Alloys // Acta Mater. – 2008. – V. 56. – P. 3177–3186.
7. Namvari M., Laitinen V., Sozinov A., Saren A., Ullakko K. Effects of 1 at. % Additions of Co, Fe, Cu, and Cr on the Properties of Ni-Mn-Ga-Based Magnetic Shape Memory Alloys // Scr. Mater. – 2023. – V. 224. – Article 115116.
8. Kharitonskii P., Bobrov N., Gareev K., Kosterov A., Nikitin A., Ralin A., Sergienko E., Testov O., Ustinov A., Zolotov N. Magnetic granulometry, frequency-dependent susceptibility and magnetic states of particles of magnetite ore from the Kovdor deposit // J. Magn. Magn. Mater. – 2022. – V. 553. – Article 169279.
9. McCord J. Progress in Magnetic Domain Observation by Advanced Magneto-Optical Microscopy. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2015. – V. 48. – Article 333001.