

УДК 53.091;620.1

Оригинальная статья

## Исследование свойств сплава Гейслера системы Ni-Mn-Ga-Cu в различном структурном состоянии

А.И. Иванова<sup>1</sup>, А.Ю. Карпенков<sup>1</sup>, Е.М. Семенова<sup>1</sup>, И.И. Мусабилов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170100, Россия, Тверь, ул. Желябова, 33

<sup>2</sup>ФГБУН «Институт проблем сверхпластичности металлов РАН»

450001, Россия, Уфа, ул. Ст. Халтурина, 39

Ivanova.AI@tversu.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.067

**Аннотация:** В работе представлены результаты исследований микроструктуры, магнитной доменной структуры и магнитных свойств образцов сплава системы  $NiMnGaCu$  в исходном и деформированном состоянии. Показано, что проведение деформационно-термической обработки, включающей гомогенизирующий отжиг, экструзию с последующим вакуумным отжигом, способствует изменению микроструктуры исходного сплава (уменьшение размера кристаллитов и мартенситных пластин). Методом магнитно-силовой микроскопии визуализированы магнитные домены на поверхности образцов, выявлена субструктура вторичных микродвойников с собственной магнитной доменной структуры. Исследование полевых зависимостей намагниченности исходного и подверженного деформационно-термическому воздействию образцов позволяет сделать вывод, что оба образца имеют одинаковое значение намагниченности насыщения. Магнитометрические измерения демонстрируют незначительное смещение температуры фазового перехода в сторону низких температур для деформированного образца. Максимальные значения на температурных зависимостях магнитокалорического эффекта для исходного и деформированного образцов строго соответствуют фазовым переходам.

**Ключевые слова:** сплавы Гейслера, мартенситный рельеф, деформационно-термическая обработка, экструзия, микро- и наноструктура, магнитная доменная структура, магнитоструктурный переход.

Иванова Александра Ивановна – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Карпенков Алексей Юрьевич – к.ф.-м.н., заведующий кафедрой физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Семенова Елена Михайловна – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Мусабилов Ирек Ильфирович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ФГБУН «Институт проблем сверхпластичности металлов РАН»

Original paper

### Study of the properties of the Heusler alloy Ni-Mn-Ga-Cu systems in different structural states

A.I. Ivanova<sup>1</sup>, A.Yu. Karpenkov<sup>1</sup>, E.M. Semenova<sup>1</sup>, I.I. Musabirov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tver State University, Tver, Russia

<sup>2</sup>Institute for Metals Superplasticity Problems of the RAS, Ufa, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.067

**Abstract:** The paper presents the results of studying the microstructure, the magnetic domain structure and some magnetic properties of  $NiMnGaCu$  alloy samples in initial and deformed states. It has been shown that carrying out deformation-thermal treatment, including homogenizing annealing, extrusion with subsequent vacuum annealing, contributes to a change in the microstructure of the initial alloy (reduction in the size of crystallites and martensitic plates). Magnetic domains on the surface of the samples were visualized by magnetic force microscopy, and a substructure of secondary microtwins with their own magnetic domain structure was revealed. A study of the field dependences of the magnetization of the initial and deformation-heat-treated samples allows us to conclude that both

samples have the same saturation magnetization value. Magnetometric measurements demonstrate an insignificant shift in the phase transition temperature towards lower temperatures for the deformed sample. The maximum values in the temperature dependences of the magnetocaloric effect for the original and deformed samples strictly correspond to phase transitions.

*Keywords: Heusler alloys, martensitic relief, deformation-thermal treatment, extrusion, micro- and nanostructure, magnetic domain structure, magnetostructural transition.*

*Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Docent, Applied Physic Department, Tver State University, ORCID: 0000-0002-5517-2294*

*Aleksey Yu. Karpenkov – Ph. D., Head of Condensed Matter Physics Department, Tver State University, ORCID: 0000-0001-8174-0964.*

*Elena M. Semenova – Ph. D., Docent, Condensed Matter Physics Department, Tver State University, ORCID: 0000-0003-2755-6933.*

*Irek I. Musabirov – Ph. D., Senior Researcher, Institute for Metals Superplasticity Problems of the RAS, ORCID: 0000-0001-5941-1961*

Поступила в редакцию/received:12.07.2025; после рецензирования/revised: 14.08.2025; принята/accepted 17.08.2025.

## **1. Введение**

Поиск новых многофункциональных магнитных smart-материалов является необходимым условием для развития техники. Сплавы Гейслера обладают уникальным сочетанием ферромагнетизма и структурных фазовых превращений, что открывает новые перспективы для создания устройств, с помощью которых возможно управление формой и размерами образцов при наложении внешнего магнитного поля. Ферромагнитные сплавы Гейслера используются в электронике, магнитофотонике, спинтронике, микроэлектромеханических системах и т.д. Наличие таких полезных свойств, как эффект памяти формы, сверхпластичность, магнитоупругость, магнитокалорический эффект и др., наблюдающихся в ферромагнитной фазе и связанных с протекающими в них структурными фазовыми переходами, позволяет выделить эти материалы в особый класс практически важных интеллектуальных функциональных материалов [1-4].

Сплавы Гейслера представляют собой тройные интерметаллические соединения с общими стехиометрическими формулами  $XYZ$  (полугейслеровы сплавы) или  $X_2YZ$  (полные сплавы Гейслера, в дальнейшем сплавы Гейслера), где  $X$  и  $Y$  – переходные металлы, а  $Z$  – элемент 3, 4, 5 группы таблицы Менделеева [5-6]. Известно, что изменения состава трёхкомпонентных сплавов Гейслера могут привести смещению температур магнитоструктурного перехода и температуры Кюри мартенситной и аустенитной фаз. Дополнительное допирование трёхкомпонентного сплава четвёртым элементом (например,  $Cu$ ,  $Co$ ,  $Cr$  и т.д.) позволяет изменять физические параметры сплава, например, повысить температуру фазовых переходов и величину магнитокалорического эффекта (МКЭ) [7-9].

Существенными недостатками сплавов Гейслера являются хрупкость и склонность к разрушению после многочисленных термоциклирований в

монокристаллическом и поликристаллическом состояниях, ухудшающие эксплуатационные свойства этих материалов. Улучшению механических и эксплуатационных свойств этих материалов способствует деформационно-термическая обработка (ДТО) такими методами, как прокатка, пластическая деформация кручением и всесторонняя изотермическая ковка [10-12].

В процессах обработки ковкой и протяжки на последних этапах деформации возможно создание текстуры. Для получения материала с острой кристаллографической текстурой наиболее интересным методом является экструзия. Этот метод позволяет получить острую кристаллографическую и металлографическую текстуры, а также увеличить анизотропию некоторых физических свойств, тем самым повысить величину ферромагнитного эффекта памяти формы [13-14]. Применение деформационных методов обработки сплавов Гейслера для формирования кристаллографической текстуры и создания больших полей внутренних напряжений является одной из важных задач повышения функциональных характеристик материала.

В данной работе приведены результаты исследования структуры и магнитных свойств образцов сплава состава  $Ni_{46,4}Mn_{17,4}Ga_{28,4}Cu_{7,8}$  в двух состояниях: исходном и деформированном.

## **2. Объекты и методы исследования**

Сплав  $Ni_{46,4}Mn_{17,4}Ga_{28,4}Cu_{7,8}$  для исследований был получен методом аргонно-дуговой плавки (АДП) из  $Ni, Mn, Ga, Cu$  высокой чистоты в лаборатории Института проблем сверхпластичности металлов (ИПСМ) РАН (г. Уфа). Данный сплав представлен в двух состояниях: 1) выплавка АДП; 2) выплавка АДП, гомогенизирующий отжиг при 970°C в течении 24 часов с последующим медленным остыванием, экструзия при 700°C, вакуумный отжиг при 850°C в течение 2 часов.

Микроструктура поверхности исходного и деформированного образцов исследовалась методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе JEOL JSM 6610 LV в режимах вторичных и отраженных электронов при ускоряющем напряжении 15-20 кэВ. Химический состав сплава  $Ni_{46,4}Mn_{17,4}Ga_{28,4}Cu_{7,8}$  определен рентгеновским энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350.

Магнитная доменная структура исследовалась на сканирующем зондовом микроскопе СЗМ Solver Next с использованием двухпроходной методики, которая позволяет регистрировать не только топографию поверхности шлифа методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), но и поля рассеяния магнитной доменной структуры методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ). Измерение магнитных характеристик

образцов были проведены в открытой магнитной цепи методом вибрационной магнитометрии. Прямые измерения магнитокалорического эффекта были проведены на уникальной измерительной установке, позволяющей проводить измерения в широком диапазоне температур от 77 до 600 К [15]. В качестве источника магнитного поля была взята система из постоянных магнитов, состоящая из двух концентрически расположенных магнитных цилиндров, каждый из которых построен по принципу дипольной Хальбах-структуры.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 а, б представлены РЭМ-изображения микроструктуры исходного и деформированного сплава  $Ni_{46,4}Mn_{17,4}Ga_{28,4}Cu_{7,8}$ . Для первого образца характерны крупные (300-700 мкм) зерна с ярко выраженным мартенситным рельефом, ширина мартенситных пластин варьируется в диапазоне 5-10 мкм (см. рис. 1 а). В деформированном состоянии происходит изменение структуры: значительно уменьшается размер зерен (100-400 мкм) (см. рис. 1 б). Мартенситный рельеф сформирован как в крупных, так и в мелких зернах, что свидетельствует о мартенситном превращении в исходном и деформированном сплаве. Распределение внутренних напряжений приводит к образованию пересечений двойниковых систем разной ориентации. Мартенсит обоих образцов имеет мультипакетную морфологию, пакеты которых состоят из пластинчатых двойниково-ориентированных первичных кристаллов. Их внутренняя субструктура, в соответствии с данными атомно-силовой микроскопии, характеризуется наличием тонких вторичных микродвойников, в которых ширина мартенситных пластин достигает 0,5-1,5 мкм.

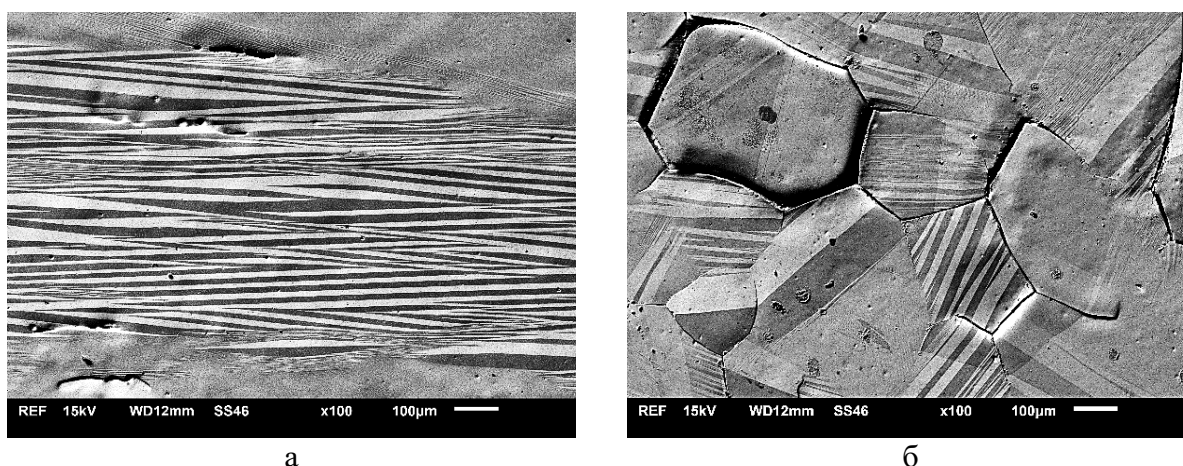


Рис. 1. РЭМ-изображения микроструктуры: а – исходного сплава, б – деформированного сплава.

Существуют различные методики для исследования магнитной доменной структуры образцов: поляризационная микроскопия,

индикаторные магнитные пленки, магнитная жидкость и т.д. В случае сплавов Гейслера данные методы имеют ограничения, связанные с выраженным рельефом в мартенситной фазе и значительной оптической анизотропией. Метод магнитно-силовой микроскопии обладает высоким разрешением визуализации полей рассеяния магнитных сплавов благодаря двухпроходной методике сканирования образцов. Поскольку соседние мартенситные пластины разделены двойниковой границей, это приводит к тому, что векторы намагниченности в соседних мартенситных вариантах оказываются направленными под некоторым углом по отношению друг к другу. В поликристаллических образцах с произвольной кристаллографической ориентацией поверхностей конфигурации магнитных доменов усложняются.

Особенностью мартенситной и магнитной доменной структуры сплавов Гейслера является их взаимосвязанный характер: 180-градусные магнитные домены непрерывны в пределах кристаллитов, при этом они пересекают плоские параллельные между собой границы мартенситных доменов. Намагниченность магнитных доменов модулирована мартенситными доменами, т.к. *c*-оси последних, являющиеся направлениями лёгкого намагничивания, находятся под углами 90° друг по отношению к другу. В результате границы между мартенситными пластинами также выполняют роль 90-градусных магнитных доменных стенок без свободных зарядов [16].

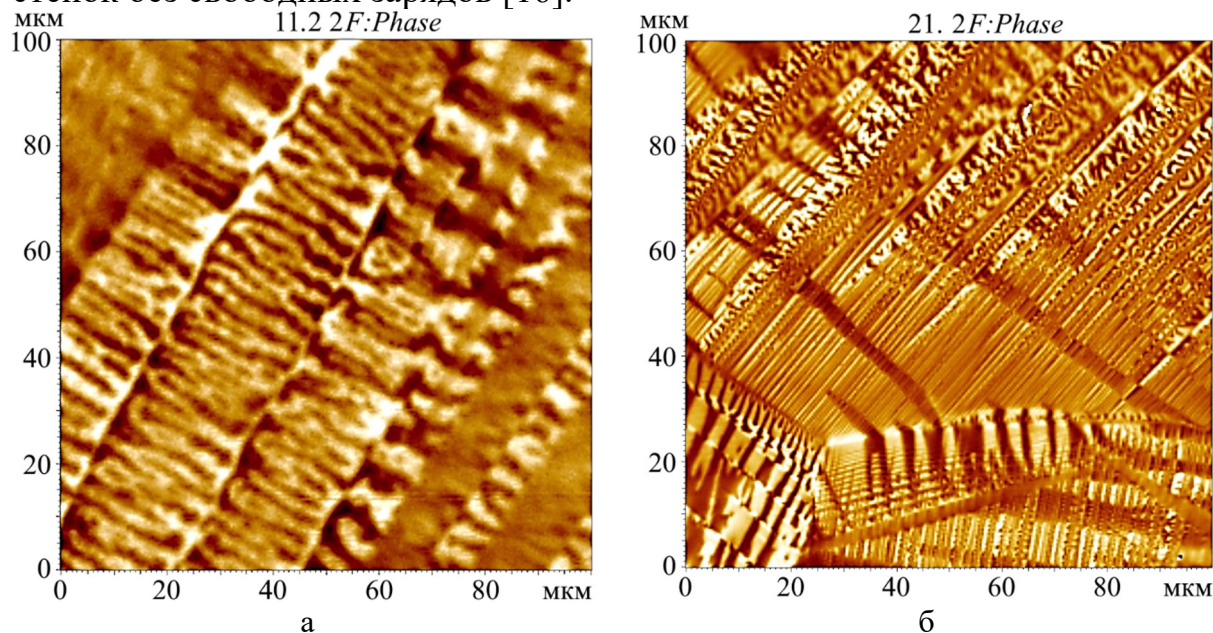


Рис. 2. МСМ-изображение доменной структуры исходного образца: а – для исходного образца, б – для деформированного образца. Размер изображения 100×100 мкм.

На рис. 2 а представлено МСМ-изображение магнитной доменной структуры исходного сплава  $Ni_{46,4}Mn_{17,4}Ga_{28,4}Cu_{7,8}$ . Отчетливо визуализируются дополнительные магнитные домены типичные для одноосных магнетиков,

ориентированные перпендикулярно мартенситным пластинам, что обусловлено анизотропией формы пластин. Ширина магнитных доменов составляет 3-7 мкм. В деформированном образце на границе трех зерен наблюдается разнообразная магнитная доменная структура: структура доменов, характерная для базисной плоскости (типа звездочки), ориентированных под углом к оси легкого намагничивания; крупные полосовые домены, а также выявляется субструктура мартенситных пластин с собственной доменной структурой (см. рис. 2 б).

Таким образом, можно утверждать, что деформационно-термическое воздействие на сплав приводит к изменению его микроструктуры, уменьшению размера зерен в поликристалле, а также влияет на доменную магнитную структуру, ширина доменов в образцах после экструзии уменьшается и составляет в среднем 1-4 мкм. В случае уменьшения размера зерен (кристаллитов) можно ожидать изменения в магнитных свойствах материала.

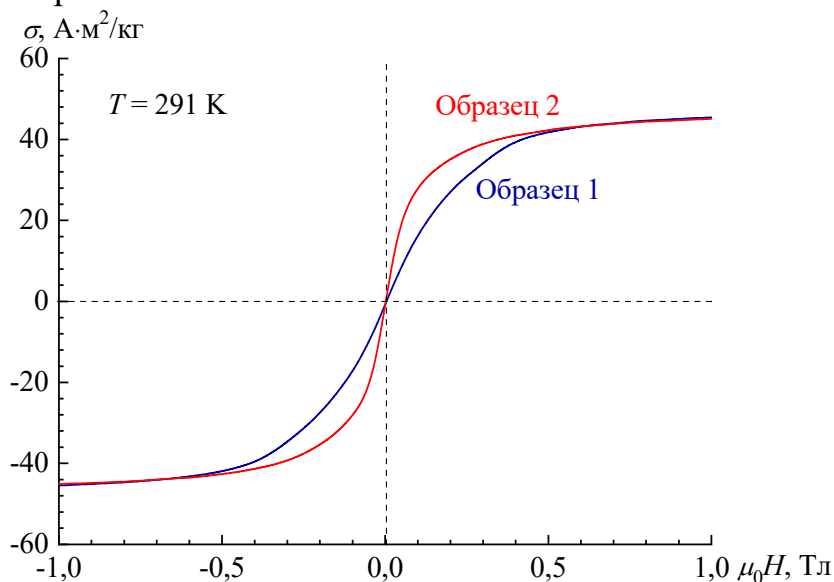


Рис. 3. Полевые зависимости удельной намагниченности исходного и деформированного образцов.

Анализ влияния деформационной обработки на температуры фазовых превращений в образцах был проведен при помощи записи температурных зависимостей намагниченности образца. Максимальное поле в зазоре магнитной системы составляет  $\mu_0 H = 1,85 \text{ Тл}$ , регистрация которого осуществлялась при помощи закрепленного датчика Холла. Для реализации адиабатических условий измерения магнитное поле изменялось со скоростью 1 Тл/с. На рис. 3 представлены полевые зависимости удельной намагниченности исходного и деформированного образцов при температуре 291 К. Следует отметить, что изотермы намагниченности образцов показывают обратимый характер. Видно, что оба образца имеют одинаковое значение намагниченности насыщения

(44 А·м/кг). Отличия в зависимостях  $\sigma(H)$  объясняются различными значениями фактора формы образцов.

На рис. 4 а представлены температурные зависимости удельной намагниченности  $\sigma(T)$ , измеренные в процессе нагревания и охлаждения в магнитном поле с индукцией 0,05 Тл, для исходного образца (синие кривые) и образца после деформационно-термической обработки (красные кривые). Небольшое значение внешнего магнитного поля при измерениях  $\sigma(T)$  было необходимо для точного определения температур фазовых переходов. Скорость изменения температуры составила 1 К/мин. Стрелками на графике показаны температуры прямого  $T_1$  и обратного  $T_2$  магнитоструктурного перехода. В диапазоне температур 300-305 К наблюдается гистерезис с шириной 1 К для исходного и деформированного образцов соответственно. Данные вибрационной магнитометрии демонстрируют смещение температуры фазового перехода в сторону низких температур на 1 К для деформированного образца, а именно:  $T_{1\text{исх}} = 304$  К,  $T_{1\text{экс}} = 303$  К;  $T_{2\text{исх}} = 301$  К,  $T_{2\text{экс}} = 300$  К.

Измерение магнитокалорического эффекта выполнено прямым методом. Исследуемые образцы вначале эксперимента охлаждались ниже точки финиша прямого мартенситного превращения. Полевые зависимости адиабатического изменения температуры измерялись в процессе нагревания и последующего охлаждения образцов в температурном диапазоне от 280 до 320 К. Скорость изменения температуры составляла 0,1 К/мин, максимально магнитное поле – 1,85 Тл. В дальнейшем из полевых зависимостей МКЭ были построены температурные зависимости.

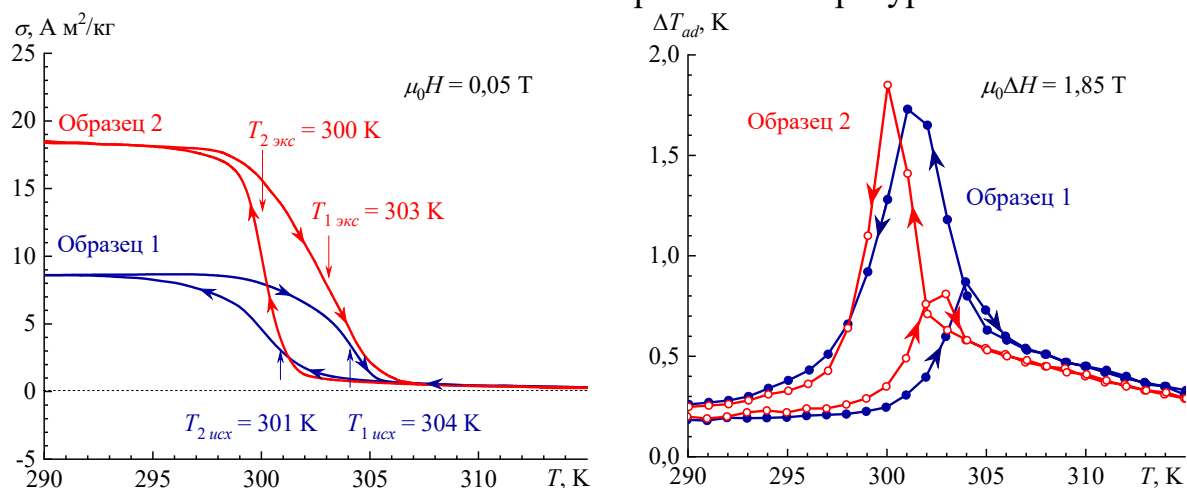


Рис. 4. Температурные зависимости исходного и деформированного образцов: а – удельной намагниченности, б – адиабатического изменения температуры.

На рис. 4 б представлены температурные зависимости изменения магнитокалорического эффекта для исходного и деформированного образцов при изменении магнитного поля 1,85 Тл. Как видно из рис. 4 б, в процессе нагревания максимальное значение МКЭ для обоих образцов

составляет 0,7 К, в то время как в процессе охлаждения – 1,8 К. Максимумы на температурных зависимостях МКЭ строго соответствуют фазовым превращениям и равны значениям, полученным из данных магнитометрии. Различия в температурах прямого ( $T_1$  на рис. 4 а) и обратного ( $T_2$  на рис. 4 а) мартенситных превращений объясняются необратимыми изменениями магнитной и кристаллической структуры, свойственными для магнитоструктурных переходов 1 рода. Обратный мартенситный переход из парамагнитного аустенита в ферромагнитный мартенсит сопровождается более резким изменением намагниченности (см. рис. 4 а, кривые на охлаждение), что объясняет более высокие значения адиабатического изменения температуры обоих образцов, измеренные в процессе охлаждения.

#### **4. Заключение**

Исследование микроструктуры и магнитных свойств сплава Гейслера  $Ni_{46,4}Mn_{17,4}Ga_{28,4}Cu_{7,8}$  в различном структурном состоянии позволяет сделать следующее заключение: применение к исходному образцу гомогенизирующего отжига при 970°C в течении 24 часов с последующим медленным остыванием, экструзии при 700°C, вакуумного отжига при 850°C в течение 2 часов приводит к изменению его микроструктуры, уменьшению размера зерен и ширины мартенситных пластин. Изменения магнитной доменной структуры коррелируют с изменениями мартенситной структуры, в деформированном образце выявляется субструктура мартенситных пластин с магнитными доменами, ширина которых не превышает 1-2 мкм. Анализ графиков полевых зависимостей удельной намагниченности исходного и деформированного образцов позволяет сделать вывод, что оба образца достигают одного и того же уровня максимальной намагниченности. Магнитометрические измерения демонстрируют незначительное смещение температуры фазового перехода в сторону низких температур для деформированного образца. Максимальные значения на температурных зависимостях адиабатического изменения температуры для исходного и деформированного образцов точно соответствуют фазовым переходам и равны значениям, полученным из данных магнитометрии. Полученные результаты могут быть полезны для создания новых функциональных сплавов с памятью формы и их использования в системах магнитного охлаждения.

*Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-0006). Исследования проведены на оборудовании Центра коллективного пользования Тверского государственного университета. Выплавка и деформационно-термическая обработка сплава выполнена в рамках государственного задания ФГБУН «Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук».*

**Библиографический список:**

1. **Васильев, А.Н.** Ферромагнетики с памятью формы / А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, Т. Такаги, В.В. Ховайло, Э.И. Эстрин // *Успехи физических наук.* – 2003. – Т. 173. – Вып. 6. – С. 577-608. DOI: 10.3367/UFNr.0173.200306a.0577.
2. **Бучельников, В.Д.** Магнитные сплавы с памятью формы - фазовые переходы и функциональные свойства / В.Д. Бучельников, А.Н. Васильев, В.В. Коледов и др. // *Успехи физических наук.* – 2006. – Т. 176. – Вып. 8. – С. 900-906. DOI: 10.3367/UFNr.0176.200608j.0900.
3. **Kamantsev, A.P.** Magnetocaloric and thermomagnetic properties of Ni<sub>2.18</sub>Mn<sub>0.82</sub>Ga Heusler alloy in high magnetic fields up to 140 kOe / A.P. Kamantsev, V.V. Koledov, A.V. Mashirov, E.T. Dilmieva et al. // *Journal of Applied Physics.* – 2015. – V. 117. – I. 16. – P. 163903-1-163903-4. DOI:10.1063/1.4918914.
4. **Гречишкин, Р.М.** Магнитные свойства и доменная структура сплавов Гейслера / Р.М. Гречишкин, А.И. Иванова, А.Д. Зигерт. – Тверь: Тверской государственный университет, 2021. – 91 с.
5. **Buchelnikov, V.D.** Magnetocaloric effect in Ni–Mn–X (X = Ga, In, Sn, Sb) Heusler alloys / V.D. Buchelnikov, V.V. Sokolovskiy // *The Physics of Metals and Metallography.* – 2011. – V. 112. – I. 7. – P. 633-665. DOI: 10.1134/S0031918X11070052.
6. **Дильмиева, Э.Т.** Формирование структуры мартенситных двойников в сплаве Гейслера Ni<sub>2.16</sub> Mn<sub>0.84</sub>Ga под действием сильных магнитных полей в адиабатических и изотермических условиях / Э.Т. Дильмиева, Ю.С. Кошкидько, В.В. Коледов и др. // *Известия РАН. Серия Физическая.* – 2017. – Т. 81. – № 11. – С. 1428-1434. DOI: 10.7868/S0367676517110011.
7. **Файзуллин, Р.Р.** Прямой и обратный магнитокалорический эффект в сплавах Гейслера Ni<sub>1.81</sub>Mn<sub>1.64</sub>In<sub>0.55</sub>, Ni<sub>1.73</sub>Mn<sub>1.80</sub>In<sub>0.47</sub> и Ni<sub>1.72</sub>Mn<sub>1.51</sub>In<sub>0.49</sub>Co<sub>0.28</sub> / Р.Р. Файзуллин, А.В. Маширов, В.Д. Бучельников и др. // *Радиотехника и электроника.* – 2016. – Т. 61. – № 10. – С. 994-1003. DOI: 10.7868/S0033849416100107.
8. **Маширов, А.В.** Эффект памяти формы в микроразмерном образце сплава Гейслера Ni–Mn–Ga–Cu / А.В. Маширов, А. Иржак, А.В. Кошелев и др. // *Физика твердого тела.* – 2020. – Т. 62. – № 6. – С. 860-863. DOI: 10.21883/FTT.2020.06.49338.35M.
9. **Dubenko, I.** Magnetocaloric effect and multifunctional properties of Mn-based Heusler alloys / I. Dubenko, T. Samanta, A.K. Pathak et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2012. – V. 324. – I. 21. – P. 3530-3534. DOI:10.1016/j.jmmm.2012.02.082.
10. **Калетина, Ю.В.** Влияние термоциклической обработки на структуру и свойства сплавов на основе Ni–Mn–In / Ю.В. Калетина, Е.Д. Ефимова, Е.Г. Герасимов, А.Ю. Калетин // *Журнал технической физики.* – 2016. – Т. 86. – Вып. 12. – С. 155-158. DOI: 10.21883/jtf.2016.12.43931.1897.
11. **Иванова, А.И.** Влияние деформации на микроструктуру и магнитные свойства сплавов Гейслера / А.И. Иванова, И.И. Мусабилов, Е.М. Семенова и др. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов.* – 2022. – Вып. 14. – С. 132-140. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.132.
12. **Kaletina, Y.V.** Structure and properties of Ni<sub>47</sub>Mn<sub>42</sub>In<sub>11</sub> alloy after severe plastic deformation / Y.V. Kaletina, E.D. Greshnova, A.Y. Kaletin, N.Y. Frolova, V.P. Pilyugin // *Physics of Metals and Metallography.* 2019. – V. 120. – I. 2. – P. 171-176. DOI: 10.1134/S0031918X19020078.
13. **Wei, L.** Introducing equiaxed grains and texture into Ni–Mn–Ga alloys by hot extrusion for superplasticity / L. Wei, Zhang X., Qiana M. et al. // *Materials and Design.* – 2016. – V. 112. – P. 339-344. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.09.076.
14. **Musabirov, I.I.** The influence of forging and extrusion on the microstructure and martensitic transformation in Ni–Mn–Ga alloys / I.I. Musabirov, I.M. Safarov, R.M. Galeyev et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2018. – V. 447. – Art. № 012024. – 4 p. DOI: 10.1088/1757-899X/447/1/012024 012024.
15. **Карпенков, А.Ю.** Влияние комбинированной деформационной обработки на магнитотепловые свойства сплавов Гейслера / А.Ю. Карпенков, П.А. Ракунов, И.И. Мусабилов, Г.Г. Дунаева // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов.* – 2022. – Вып. 14. – С. 149-158. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.149.
16. **Бречко, Т.М.** Мартенситная и магнитная доменная структура ферроиков семейств Ni– Mn– Ga и Co– Ni– Ga / Т.М. Бречко, Р.М. Гречишкин, С.Е. Ильяшенко, и др. // *Физика твердого тела.* – 2010. – Т. 52. – Вып. 1. – С. 97-99.

**References:**

1. Vasil'ev A.N., Buchel'nikov V.D., Takagi T., Khovailo V.V., Estrin E.I. Shape memory ferromagnets, *Physics-Uspexhi*, 2003, vol. 46, issue 6, pp. 559-588. DOI: 10.1070/PU2003v046n06ABEH001339.
2. Buchel'nikov V.D. Vasiliev A.N., Koledov V.V. et al. Magnetic shape-memory alloys: phase transitions and

- functional properties, *Physics-Uspekhi*, 2006, vol. 49, issue 8, pp. 871-877. DOI: 10.1070/PU2006v049n08ABEH006081.
3. Kamantsev A.P., Koledov V.V., Mashirov A.V., Dil'mieva E.T. et al. Magnetocaloric and thermomagnetic properties of Ni<sub>2.18</sub>Mn<sub>0.82</sub>Ga Heusler alloy in high magnetic fields up to 140 kOe, *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 117, issue 16, pp. 163903-1-163903-4. DOI:10.1063/1.4918914.
4. Grechishkin R.M., Ivanova A.I., Zigert A.D. *Magnitnye svoystva i domennaya struktura splavov Geislера* [Magnetic properties and domain structure of Heusler alloys]. Tver, Tverskoy Gosudarstvennyj Universitet Publ., 2021, 91 p. (In Russian).
5. Buchelnikov V.D., Sokolovskiy V.V. Magnetocaloric effect in Ni–Mn–X (X = Ga, In, Sn, Sb), *The Physics of Metals and Metallography*, 2011, vol. 112, issue 7, pp. 633-665. DOI: 10.1134/S0031918X11070052.
6. Dilmieva E.T., Koledov V.V., Kamantsev A.P. et al. Formation of a martensitic twins structure in Ni<sub>2.16</sub>Mn<sub>0.84</sub>Ga Heusler alloy by high magnetic fields under adiabatic and isothermal conditions // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2017, vol. 81, issue 11, pp. 1283-1288. DOI: DOI: 10.3103/S1062873817110077.
7. Fayzullin R.R., Buchelnikov V.D., Taskaev S.V. et al. Direct and inverse magnetocaloric effect in Ni<sub>1.81</sub>Mn<sub>1.64</sub>In<sub>0.55</sub>, Ni<sub>1.73</sub>Mn<sub>1.80</sub>In<sub>0.47</sub> и Ni<sub>1.72</sub>Mn<sub>1.51</sub>In<sub>0.49</sub>Co<sub>0.28</sub> Heusler alloys, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, issue 10, pp. 1129-1138. DOI: 10.1134/S1064226916100107.
8. Mashirov A.V., Irzhak A.V., Koshelev A.V. et al. Shape memory effect in microsize sample of Ni–Mn–Ga–Cu Heusler alloy, *Physics of the Solid State*, vol. 62, issue 6, pp. 968-971. DOI: 10.1134/S1063783420060153.
9. Dubenko I., Samanta T., Pathak A. K. et al. Magnetocaloric effect and multifunctional properties of Mn-based Heusler alloys, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, vol.324, issue 21, pp. 3530-3534. DOI:10.1016/j.jmmm.2012.02.082.
10. Kaletina Yu.V., Efimova E.D., Gerasimov E.G., Kaletin A.Yu. Effect of thermal cycling on structure and properties of Ni–Mn–In-based alloys, *Technical Physics*, 2016. V. 61, issue 12, pp. 1894-1897. DOI: 10.1134/S1063784216120197.
11. Ivanova A.I., Musabirov I.I., Semenova E.M. et al. Vliyanie deformatsii na mikrostrukturu i magnitnye svoystva splavov Geislера [Influence of deformation on the microstructure and magnetic properties of Heusler alloys], *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur inanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 132-140. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.132. (In Russian).
12. Kaletina Y.V., Greshnova E.D., Kaletin A.Y., Frolova N.Y., Pilyugin V.P. Structure and properties of Ni<sub>47</sub>Mn<sub>42</sub>In<sub>11</sub> alloy after severe plastic deformation, *Physics of Metals and Metallography*, 2019, vol. 120, issue 2, pp. 171-176. DOI: 10.1134/S0031918X19020078.
13. Wei L., Zhang X., Qiana M. et al. Introducing equiaxed grains and texture into Ni–Mn–Ga alloys by hot extrusion for superplasticity, *Materials and Design*, 2016, vol. 112, pp. 339-344. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.09.076.
14. Musabirov I.I., Safarov I.M., Galeyev R.M. et al. The influence of forging and extrusion on the microstructure and martensitic transformation in Ni–Mn–Ga alloys, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 447, art. no. 012024, 4 p. DOI: 10.1088/1757-899X/447/1/012024 012024.
15. Karpenkov A.Yu., Rakunov P.A., Musabirov I.I., Dunaeva G.G. Vliyanie kombinirovannoj deformacionnoj obrabotki na magnitoteplovyje svoystva splavov Geislера [Influence of deformation processing on magnetocaloric effect of Heusler alloys] *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur inanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 149-158. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.149. (In Russian).
16. Breczko T. M., Grechishkin R.M., Ilyashenko et al. Martensitic and magnetic domain structures of ferroics of the Ni–Mn–Ga and Co–Ni–Ga families, *Physics of the Solid State*, 2010, vol.52, issue 1, pp.101-104. DOI: 10.1134/S1063783410010178.