Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственной
университет, 2021

УДК 538.911

Оригинальная статья

МИКРОМОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ЛЕНТ СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА

А.И. Иванова¹, А.Д. Зигерт¹, С.А. Третьяков¹, Е.М. Семенова¹, Э.Т. Дильмиева²,
А.Ю. Карпенков¹, Е.В. Барабанова¹, Н.Ю. Сдобняков¹

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170100, Россия, Тверь, ул. Желябова, 33

²ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова

Российской академии наук»

125009, Россия, Москва, ул. Моховая, 11, корпус 7

ivanova.ai@tversu.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.166

Аннотация: В работе представлены результаты исследований микро- и наноструктуры поверхности быстрозакаленных лент сплавов Гейслера ($Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$, $Ni_{57}Mn_{21}Al_{19}Si_3$, $Ni_{40}Co_{10}Mn_{34}Al_{16}$) методами сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии.

Рассмотрено влияние химического состава на размер, геометрию границ и структуру зерен. Показано, что все исследуемые образцы обладают наноразмерным мартенситным рельефом, определены его параметры. Установлено, что поперечное сечение лент представлено кристаллическими зёрнами разной формы и размера, что обусловлено отличием скоростей охлаждения по краям и в центре ленты. Проведено элементное картирование поверхности поперечного сечения лент с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра, установлено равномерное распределение химических элементов в образцах. Показано, что легирование лент состава $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$ кобальтом вызывает изменение микроморфологии поверхности и оказывает значительное влияние на ход полевых зависимостей намагниченности и доменную структуру образцов.

Ключевые слова: сплавы Гейслера, структурное превращение, быстрозакаленные ленты, микроструктура поверхности, мартенситный рельеф.

1. Введение

Современные функциональные магнитные материалы, проявляющие способность изменять форму и размеры под влиянием температуры, а также электрического или магнитного поля, широко внедряются в устройства электроники и автоматики в качестве исполнительных механизмов и датчиков. В особый класс этих материалов выделились ферромагнитные сплавы Гейслера [1, 2]. Исследовательский интерес к ферромагнетикам с памятью формы обусловлен тем, что в них наблюдаются фазовые переходы, включающие структурные, мартенситные, магнитные и магнитоструктурные превращения. Сплавы Гейслера представляют собой тройные интерметаллические соединения с общими стехиометрическими формулами XYZ или X_2YZ , где X и Y – переходные металлы, а Z – элемент 3,4,5 группы таблицы Менделеева. Сплавы Гейслера Ni_2MnX ($X = Al, Ga, In, Sn, Sb$) демонстрируют необычное сочетание ферромагнитных свойств и мартенситного превращения (МП) из

высокотемпературной фазы (аустенит) в низкотемпературную фазу (мартенсит) [3, 4]. Следует отметить особенности мартенситного превращения: МП сильно зависит от химического состава сплава и проходит с высокой скоростью; МП характеризуется деформацией формы (или поверхностным рельефом); развитие МП происходит главным образом за счет образования новых кристаллов и в результате увеличения размеров ранее возникших кристаллов. МП могут быть обратимыми и необратимыми [5]. Новая фаза образуется в форме тонких пластинок (мартенситного рельефа), определенным образом ориентированных относительно кристаллографических осей. Анализ микроструктуры позволяет определить морфологические особенности рельефа в низкотемпературных фазах, параметры мартенситных пластин, выявить субструктуру кристаллических зерен. Достаточно хорошо изучены свойства массивных сплавов Гейслера: поликристаллических слитков и монокристаллов, менее подробно исследованы быстрозакаленные ленты данных сплавов. Авторы [6] достаточно подробно описали структуру и топографию быстрозакаленных лент $Ni_{48}Mn_{39,5}Sn_{12,5-x}Al_x$. В работах [7-11] рассмотрены эффекты памяти формы, магнитокалорический эффект пленок и быстрозакаленных лент сплавов Гейслера. Показано, что быстрозакаленные ленты могут быть механически стабильными, иметь хорошие параметры мартенситного перехода: температуру близкую к комнатной и узкий температурный гистерезис, что делает их перспективными для применения в технологии сенсоров и актюаторов.

Настоящая работа посвящена исследованию микроморфологии и особенностей рельефа поверхности быстрозакаленных лент состава $NiMnAl$, легированных Co и Si .

2. Объекты и методы исследования

Быстрозакаленные ленты составов $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$, $Ni_{57}Mn_{21}Al_{19}Si_3$, $Ni_{40}Co_{10}Mn_{34}Al_{16}$ были получены методом спиннингования. Суть метода состоит в следующем: исходный слиток, расплавленный с помощью индукционного нагрева, выдавливается инертным газом (аргоном) под давлением через отверстие в тигле на поверхность вращающегося водоохлаждаемого барабана, быстро затвердевая и превращаясь в ленту. В результате были получены быстрозакаленные ленты толщиной 30–40 мкм и шириной 2–3 мм.

Микроструктура поверхности и излома лент исследовалась методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе JEOL JSM 6610LV, оснащенном рентгеновским энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350, в режимах вторичных и отраженных электронов при ускоряющем напряжении 15–20 кэВ. Оценка параметров

рельефа поверхности проводились с помощью комплекса для микроанализа и морфологического анализа поверхности NanoEducator2 и сканирующего зондового микроскопа SOLVER P47 в полуконтактном режиме. Для измерения кривых намагничивания и проведения термоманнитного анализа использовался метод вибрационного магнитометра, в основе которого лежит измерение ЭДС индукции, возникающей в системе измерительных катушек при изменении магнитного потока, создаваемого образцом.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

В процессе спиннингования ленты приобретают контактную (обращенную к поверхности вращающегося барабана) и неконтактную (свободную) стороны. Контактная сторона повторяет рельеф поверхности барабана, а рельеф свободной стороны формируется жидким расплавом в момент затвердевания и определяется параметрами спиннингования (температурой нагрева, скоростью охлаждения, направлением теплоотвода и т.п.)

Рис. 1. Микроструктура быстрозакаленной ленты $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$, выявленная методом РЭМ: а – контактная поверхность ленты, б – излом ленты (поперечное сечение).

На рис. 1а представлено РЭМ-изображение контактной поверхности быстрозакаленной ленты $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$, которое характерно для всех лент, представленных в данной работе. Микроструктура представляет собой неоднородный отпечаток поверхности барабана, на который изливался расплав, с вытянутыми вдоль направления вращения воздушными карманами. Исследование структуры излома ленты (см. рис. 1 б) показало наличие столбчатых кристаллов примыкающих к контактной стороне ленты, расположенных нормально к поверхности охлаждения, т.е. в направлении интенсивного отвода тепла. Зона поперечного сечения, расположенная у свободной поверхности ленты, состоит из неориентированных кристаллов со средним размером ~ 10 мкм.

Химический состав лент был определен методом энергодисперсионного микроанализа и представлен в Таблице 1. Номинальная и реальная концентрации элементов в исследуемых быстрозакаленных лентах незначительно отличаются, что может быть обусловлено испарением элементов в процессе индукционной плавки.

Таблица 1. Концентрация химических элементов в быстрозакаленных лентах.

Образец	Содержание в ат. %				
	<i>Al</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>Co</i>
$Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$	22	23	55	–	–
$Ni_{57}Mn_{21}Al_{19}Si_3$	19	23	56	2	–
$Ni_{40}Co_{10}Mn_{34}Al_{16}$	13	34	43	–	11

Для подтверждения элементного состава и оценки распределения химических элементов в образцах проводилось элементное картирование, заключающееся в анализе характеристического рентгеновского излучения от исследуемого объекта, возникающего вследствие его облучения электронами с энергией 15–20 кэВ. На рис. 2 представлено элементное картирование поверхности поперечного сечения ленты $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$, демонстрирующее достаточно равномерное распределение никеля, марганца и алюминия.

Рис. 2. Карта распределения элементов на изломе ленты $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$ (Ni – ▲, Mn – ▲, Al – ▲).

На рис. 3 представлено типичное РЭМ-изображение структуры свободной поверхности ленты $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$ где видна ее поликристаллическая структура: на ленте есть крупные зерна размером 10–15 мкм, расположенные по краям и зерна меньшего размера (5–10 мкм) в центральной части. Необходимо отметить, что заметные различия зерен по размеру характерны для образцов, получаемых быстрой закалкой.

Рис. 3. Микроструктура поверхности ленты $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$: а – на краю, б – в центре.

Полученные изображения демонстрируют наличие на свободной поверхности ленты $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$ мартенситного рельефа, возникающего в сплавах Гейслера в результате структурного превращения из высокотемпературной в низкотемпературную фазу. В пределах зерна мартенсит имеет пакетную морфологию пластинчатых попарно двойниково-ориентированных кристаллов. Пластины, принадлежащие одному пакету, могут проходить через границу зерна и проникать в другой пакет, при этом границы пакетов могут приобретать «елочное» строение. Исследование топографии поверхности быстрозакаленных образцов методом атомно-силовой микроскопии позволило получить сведения о размерах мартенситных пластин (см. рис. 4). Ширина мартенситных пластин составляет 0,5–0,7 мкм, высота – в центральной части ленты 20–60 нм (см. рис. 4), в зернах, расположенных по краям ленты – 70–90 нм.

Рис. 4. Мартенситный рельеф зерна, выявленный на свободной поверхности ленты $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$ методом атомно-силовой микроскопии (АСМ): а – 3D-поверхность, б – 2D - профиль поверхности зерна.

Наличие наноразмерного мартенситного рельефа с простой пакетной морфологией наблюдается и в лентах быстрой закалки состава $Ni_{57}Mn_{21}Al_{19}Si_3$, что свидетельствует о наличии структурного мартенситного превращения в этом образце (см. рис. 5).

Рис. 5. Свободная поверхность ленты $Ni_{57}Mn_{21}Al_{19}Si_3$: а – АСМ-изображение поверхности, б – типичный АСМ-профиль поверхности зерна ленты; в – микроструктура, выявленная методом РЭМ.

Периодичность рельефа продемонстрирована на рис. 5: ширина мартенситных пластин составила $\sim 0,5$ мкм, высота – 20–30 нм. Межзеренные границы имеют округло-ступенчатую геометрию. Кроме того, легирование лент $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$ кремнием и кобальтом приводит к уменьшению среднего размера зерен до 5–7 мкм.

При РЭМ-исследованиях лент $Ni_{40}Co_{10}Mn_{34}Al_{16}$ было установлено, что их поверхность обладает особой морфологией, а именно, наличием субструктуры зерен, напоминающей по своему электронно-микроскопическому изображению «твидовый» контраст, характерный, в первую очередь, для предмартенситных состояний и обусловленный

наличием в кристаллах кооперативных, сдвиговых смещений атомов. При внимательном исследовании топографии на АСМ в пределах каждого зерна лент обнаружены наноразмерные пластины, отличающиеся периодичностью, высотой 4–7 нм, шириной 0,5 мкм (см. рис. 6).

Рис. 6. Свободная поверхность ленты $Ni_{40}Co_{10}Mn_{34}Al_{16}$: а – АСМ-изображение, б – АСМ-профиль поверхности зерна ленты, в – РЭМ-изображение.

Интересно отметить, что быстрозакаленные ленты $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$ и $Ni_{57}Mn_{21}Al_{19}Si_3$ обладают низкой намагниченностью, как в мартенситной, так и в аустенитной фазах, а полевые зависимости намагниченности носят линейный характер в низкотемпературной фазе. Однако, легирование сплавов кобальтом, приводит не только к морфологическим изменениям поверхности, но и способствует росту намагниченности насыщения этих образцов, что обусловлено более высоким магнитным моментом атомов кобальта.

Полевые зависимости намагниченности имеют вид, типичный для ферромагнитных материалов (см. рис. 7 а). По экспериментально измеренной температурной зависимости намагниченности образцов $Ni_{40}Co_{10}Mn_{34}Al_{16}$, была определена температура Кюри $T_c = 391\text{ K}$. Хорошо

известно, что крайне сложно наблюдать магнитную доменную структуру на быстрозакаленных магнитных материалах. Это связано с тем что градиенты полей рассеяния, возникающие вблизи структурных неоднородностей, границ фаз или зерен мешают визуализации доменной структуры соединения. С помощью метода, сочетающего магнитный коллоид и сканирующую электронную микроскопию, подробно описанного в [12], удалось визуализировать доменную структуру ленты состава $Ni_{40}Co_{10}Mn_{34}Al_{16}$. На рис. 7 представлены полевые зависимости удельной намагниченности для этой ленты в диапазоне температур 300–390 К, а также РЭМ-изображение лабиринтной доменной структуры, искаженной неровностями свободной поверхности ленты.

Рис. 7. Полевые зависимости намагниченности (а), РЭМ-изображение магнитной доменной структуры ленты $Ni_{40}Co_{10}Mn_{34}Al_{16}$ (б).

4. Заключение

Быстрозакаленные ленты сплавов Гейслера являются сложным объектом для исследований. Развитие структурных фазовых превращений в этих материалах тесно связано с изменением микро и наноструктуры массивных и ленточных образцов. Анализ микроморфологии поверхности быстрозакаленных лент сплавов Гейслера позволяет получать новые данные об особенностях структуры поверхности и поперечных сечений, что способствует развитию функциональных свойств этих уникальных сплавов. В ходе исследований было выявлено зеренное строение лент состава $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$, $Ni_{57}Mn_{21}Al_{19}Si_3$, $Ni_{40}Co_{10}Mn_{34}Al_{16}$, особенности микроструктуры контактной и свободной поверхностей образцов, отличие геометрии и размера зерен этих поверхностей, обусловленное разными условиями формирования кристаллического строения ленты у контактной и свободной сторон сплавов. Представлены РЭМ и АСМ изображения мартенситного рельефа на лентах, проведена оценка параметров

мартенситных пластин, установлено различие рельефа поверхности в зависимости от химического состава образцов. Показано возникновение субструктуры в зернах лент состава $Ni_{40}Co_{10}Mn_{34}Al_{16}$, а также изменение магнитных свойств, обусловленное легированием лент кобальтом. Продемонстрирована возможность визуализации магнитной доменной структуры в быстрозакаленных сплавах Гейслера.

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2020-0007) и при поддержке гранта Президента РФ № МК-355.2020.2. Исследования проведены в лабораториях электронной микроскопии и магнитных материалов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

Библиографический список:

1. 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.
2. Гречишкин, Р.М. Магнитные свойства и доменная структура сплавов Гейслера / Р.М. Гречишкин, А.И. Иванова, Е.В. Барабанова. – Тверь: Тверской государственный университет, 2016. – 75 с.
3. Entel, P. Shape memory alloys: a summary of recent achievements / P. Entel, V.D. Buchelnikov, M.E. Gruner et al. // Materials Science Forum. – 2008. – V. 583. – P. 21-41. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.583.21.
4. De Groot, R.A. New class of materials: half-metallic ferromagnets / R.A. de Groot, F.M. Mueller, P.G. van Engen, K.H.J. Buschow // Physical Review Letters. – 1983. – V. 50. – I. 25. – P. 2024-2027. DOI:10.1103/PhysRevLett.50.2024.
5. 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.
6. Czaja, P. Surface topography, microstructure and magnetic domains in Al for Sn substituted metamagnetic $NiMnSn$ Heusler alloy ribbons / P. Czaja, W. Maziarz, J. Przewoznik et al. // Intermetallics. – 2014. – V.55. – P. 1-8. DOI: 10.1016/J.INTERMET.2014.07.001.
7. Dilmieva, E.T. Rapidly quenched ferromagnetic ribbons with shape memory for magnetically controlled micromechanic devices / E.T. Dilmieva, A.V. Irzhak, A.P. Kamantsev et al. // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2017. – V. 62. – I. 7. – P. 809-819. DOI: 10.1134/S106422691707004X.
8. Lyange, M.V. Effect of disorder on magnetic properties and martensitic transformation of Co -doped $Ni-Mn-Al$ Heusler alloy / M.V. Lyange, V.V. Sokolovskiy, S.V. Taskaev et al. // Intermetallics. – 2018. – V. 102. – P. 132-139. DOI: 10.1016/j.intermet.2018.09.008.
9. Weise, B. Role of disorder when upscaling magnetocaloric $Ni-Co-Mn-Al$ Heusler alloys from thin films to ribbons / B. Weise, B. Dutta, N. Teichert, A. Hütten, T. Hickel, A. Waske // Scientific Reports. – 2018. – V. 8. – Art. № 9147. – 10 p. DOI: 10.1038/s41598-018-27428-8.
10. Schwabe, S. Probing the martensitic microstructure of magnetocaloric Heusler films by synchrotron diffraction / S. Schwabe, B. Schleicher, R. Niemann et al. // Energy Technology. – V. 6. – I. 8. – P. 1453-1462. DOI: 10.1002/ente.201800175.
11. Kalimullina, E.T. Magnetic shape memory microactuators / E. Kalimullina, A. Kamantsev, V. Koledov et al. // Physica Status Solidi C. – 2014. – V. 11. – I. 5-6. – P. 1023-1025. DOI: 10.1002/pssc.201300718.
12. Ivanova, A.I. Colloid-SEM method for the investigation of magnetic domain structures / A.I. Ivanova, E.M. Semenova, O.V. Zhdanova, T.V. Rostova, R.M. Grechishkin // Micron. – 2020. – V. 137. – Art. № 102899. – 6 p. DOI: 10.1016/j.micron.2020.102899.

References:

1. 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.
2. Grechishkin R.M., Ivanova A.I., Barabanova E.V. *Magnitnye svoystva i domennaya structura splavov Geislera* [Magnetic properties and domain structure of Heusler alloys]. Tver, Tverskoy Gosudarstvennyi Universitet Publ., 2016, 75 p. (In Russian).
3. Entel P., Buchelnikov V.D., Gruner M.E. Shape memory alloys: a summary of recent achievements, *Materials Science Forum*, 2008, vol. 583, pp. 21-41. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.583.21.
4. De Groot R.A., Mueller F.M., Van Engen P.G., Buschow K.N.J. New class of materials: half-metallic ferromagnets, *Physical Review Letters*, 1983, vol. 50, issue 25, pp. 2024-2027. DOI: 10.1103/PhysRevLett.50.2024.
5. Vasil'ev A.N., Buchel'nikov V.D., Takagi T., Khovailo V.V., Estrin E.I. Shape memory ferromagnets, *Physics-Uspekhi*, 2003, vol. 46, issue 6, pp. 559-588. 10.1070/PU2003v046n06ABEH001339.
6. Czaja P., Maziarz W., Przewoznik J. et al. Surface topography, microstructure and magnetic domains in *Al* for *Sn* substituted metamagnetic *NiMnSn* Heusler alloy ribbons, *Intermetallics*, 2014, vol.55, pp. 1-8. DOI: 10.1016/J.INTERMET.2014.07.001.
7. Dilmieva E.T., Irzhak A.V., Kamantsev A.P. et al. Rapidly quenched ferromagnetic ribbons with shape memory for magnetically controlled micromechanic devices, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, vol. 62, issue 7, pp. 809-819. DOI: 10.1134/S106422691707004X.
8. Lyange M.V., Sokolovskiy V.V., Taskaev S.V. et al. Effect of disorder on magnetic properties and martensitic transformation of *Co*-doped *Ni–Mn–Al* Heusler alloy, *Intermetallics*, 2018, vol. 102, pp. 132-139. DOI: 10.1016/j.intermet.2018.09.008.
9. Weise, B. Dutta B., Teichert N., Hütten A., Hickel T., Waske A. Role of disorder when upscaling magnetocaloric *Ni–Co–Mn–Al* Heusler alloys from thin films to ribbons, *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, art. no. 9147, 10 p. DOI: 10.1038/s41598-018-27428-8.
10. Schwabe S., Schleicher B., Niemann R. et al Probing the martensitic microstructure of magnetocaloric Heusler films by synchrotron diffraction, *Energy Technology*, 2018, vol. 6, issue 8, pp. 1453-1462. DOI: 10.1002/ente.201800175.
11. Kalimullina E., Kamantsev A., Koledov V. et al. Magnetic shape memory microactuators, *Physica Status Solidi C*, 2014, vol. 11, .issue 5-6, pp. 1023-1025. DOI: 10.1002/pssc.201300718.
12. Ivanova A.I., Semenova E.M., Zhdanova O.V., Rostova T.V., Grechishkin R.M. Colloid-SEM method for the investigation of magnetic domain structures, *Micron*, 2020, vol. 137, art. no. 102899, 6 p. DOI: 10.1016/j.micron.2020.102899.

Original paper

MICROMORPHOLOGY OF THE SURFACE OF RAPIDLY QUENCHED HEUSLER-ALLOYS

A.I. Ivanova¹, A.D. Zigert¹, S.A. Tretyakov¹, E.M. Semenova¹, E.T. Dilmieva², A.Yu. Karpenkov¹,
E.V. Barabanova¹, N.Yu. Sdobnyakov¹

¹*Tver State University, Tver, Russia*

²*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.166

Abstract: The paper describes the results of the scanning electronic and atomic force microscopy research of the surface structure of the $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$, $Ni_{57}Mn_{21}Al_{19}Si_3$, $Ni_{40}Co_{10}Mn_{34}Al_{16}$ rapidly quenched ribbons. The influence of the chemical composition on the size, boundary geometry and structure of the grains is considered. It is shown that all the test samples have a nano-sized martensitic relief, and its parameters are determined. It has been established that the cross section of the ribbon is represented by crystalline grains of different shapes which are due to differences in the cooling rates along the edges and in the center of the samples. Elemental mapping of the cross-sectional surface of the ribbons was carried out using an X-ray energy dispersive spectrometer, and a uniform distribution of chemical elements in the samples was established. It is shown that the cobalt doping of $Ni_{57}Mn_{21}Al_{22}$ ribbon causes changes in the micromorphology of the surface and has a significant effect on the magnetic properties of rapidly quenched ribbons: field dependences of themagnetization and domain structure.

Keywords: *Heusler alloys, structural transformation, rapidly quenched ribbons, surface microstructure, martensitic relief.*

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

Зигерт Александр Дмитриевич – старший преподаватель кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Третьяков Сергей Андреевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

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

Дильмиева Эльвина Тимурбулатовна – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории магнитных материалов Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

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

Барабанова Екатерина Владимировна – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Сдобняков Николай Юрьевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Docent, Applied Physics Department, Tver State University

Alexandr D. Zigert – Senior Lecturer, Applied Physics Department, Tver State University

Sergey A. Tretyakov – Ph. D., Docent, Applied Physics Department, Tver State University

Elena M. Semenova – Ph. D., Docent, Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Elvina T. Dilmieva – Ph. D., Senior Researcher, Magnetic Materials Laboratory, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics Russian Academy of Sciences

Aleksey Yu. Karpenkov – Ph. D., Docent, Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Ekaterina V. Barabanova – Ph. D., Docent, Applied Physics Department, Tver State University

Nickolay Yu. Sdobnyakov – Ph. D., Docent, General Physics Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 01.09.2021; после рецензирования/revised: 24.09.2021; принята/accepted 01.10.2021.