

Белослудцева Е.С., Пушин А.В., Свирид А.Э., Пушин В.Г., Толмачев Т.П. Микроструктура и свойства сплавов с эффектами памяти формы на основе интерметаллида Ni–Mn, легированных Ti, Al, Ga и Fe // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 33–41. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.04

Belosludtseva E.S., Pushin A.V., Svirid A.E., Pushin V.G., Tolmachev T.P. Microstructure and features of splaves with effects of memorial formate form on the basic of intermetallide Ni-Mn, legured Ti, Al, Ga and Fe. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 33–41. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.04

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 3, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.04
УДК 538.91

Е.С. Белослудцева¹, А.В. Пушин^{1,2}, А.Э. Свирид¹, В.Г. Пушин^{1,2}, Т.П. Толмачев¹

¹ Институт физики металлов им. М.Н. Микеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия

**МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВОВ С ЭФФЕКТАМИ ПАМЯТИ ФОРМЫ
НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Ni–Mn, ЛЕГИРОВАННЫХ Ti, Al, Ga И Fe**

Методами измерений электросопротивления, микротвердости, дифракции рентгеновских лучей, трансмиссионной и растровой электронной микроскопии (ТЭМ и РЭМ) в данной работе выполнены систематические исследования термоупругих мартенситных превращений (ТМП) и атомного упорядочения, а также магнитных фазовых переходов и свойств сплавов четырех квазибинарных систем на основе $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{Ti}_x$ ($x = 0...25$), $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-y}\text{Al}_y$ ($y = 0...25$), $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-z}\text{Ga}_z$ ($z = 0...25$) и $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-d}\text{Fe}_d$ ($d = 0...25$), $\text{Ni}_{50-\beta}\text{Mn}_{50}\text{Fe}_{\beta}$ ($\beta = 0...25$) после термической обработки и деформации кручением под высоким давлением (КВД). Методами резистометрии и магнитометрии измерены критические температуры прямых и обратных фазовых переходов. Установлены структура и фазовый состав сплавов, структурные типы термоупругого мартенсита и физико-механические свойства, зависимость от химического состава всех исследованных сплавов. Выявлено, что легирование третьим компонентом (Ti, Al, Ga или Fe) понижает критические температуры ТМП по сравнению с бинарным интерметаллидом NiMn. Построены диаграммы фазовых превращений.

Цели данной работы – комплексное исследование кристаллоструктурных особенностей, фазовых превращений и свойств сплавов на основе системы Ni–Mn, бинарных и тройных квазибинарных, легированных Al, Ti, Ga, Fe, а также построение их фазовых диаграмм.

Ключевые слова: термоупругое мартенситное превращение, магнитный переход, фазовый состав, Ni–Mn, мартенсит, электронно-микроскопические исследования, кручение под высоким давлением, физико-механические свойства, легирование, фазовые диаграммы, фактография, изломы.

E.S. Belosludtseva¹, A.V. Pushin^{1,2}, A.E. Svirid¹, V.G. Pushin^{1,2}, T.P. Tolmachev¹

¹ Institute of Metal Physics named after M.N. Mikheev of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation

**MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF ALLOYS WITH SHAPE MEMORY EFFECTS BASED
ON NI-MN INTERMETALLIDE DOPED WITH TI, AL, GA AND FE**

In this work, systematic studies of thermoelastic martensitic transformations (TMTs) and atomic ordering, as well as magnetic phase transformations and properties of alloys of 4 quasi-binary systems based on $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{Ti}_x$ ($x = 0...25$), $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-y}\text{Al}_y$ ($y = 0...25$), $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-z}\text{Ga}_z$ ($z = 0...25$) and $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-d}\text{Fe}_d$ ($d = 0...25$), $\text{Ni}_{50-\beta}\text{Mn}_{50}\text{Fe}_{\beta}$ ($\beta = 0...25$) after heat treatment and deformation by high pressure torsion (HPT) were carried out. The methods of measurements of electrical resistance, microhardness, X-ray diffraction, transmission and scanning electron microscopy (TEM and SEM) were used. The temperatures of the TMTs, the phase composition and structure of the alloys, the structural types of thermoelastic martensite, the physical and mechanical properties, and the dependence on the chemical composition of all investigated alloys were established. The temperature-concentration regularities of the existence of these phases were determined. The critical temperatures of forward and reverse phase transitions in the alloys under study were measured by resistometry and magnetometry. It was found that doping with the third component (Ti, Al, Ga, or Fe) lowers the critical temperatures of the TMTs, shape memory effects (SMEs), and pseudoelasticity (PE) compared to the binary intermetallic NiMn. The phase diagrams were constructed.

The purpose of this work is a comprehensive study of the crystal structure characteristics, phase transformations and properties of alloys based on the Ni-Mn system, binary and ternary quasi-binary doped Al, Ti, Ga, Fe, the construction of their phase diagrams.

Keywords: thermoelastic martensitic transformation, magnetic transition, phase composition, Ni–Mn, martensite, electron microscopic studies, high-pressure torsion, physical and mechanical properties, doping, phase diagrams, fractography, fractures.

Имеется большое количество публикаций, посвященных исследованиям мартенситных превращений [1–36], в том числе в сплавах на основе Ni–Mn, как в бинарных, так и легированных третьими компонентами [1–10, 12–14, 18–21, 23–29, 32–35]. Авторами работы ранее были исследованы различными методами сплавы следующих квазибинарных составов: $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{Ti}_x$ ($x = 0 \dots 25$), $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-y}\text{Al}_y$ ($y = 0 \dots 25$), $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-z}\text{Ga}_z$ ($z = 0 \dots 25$). Определены значения температуры фазовых переходов, установлен фазовый состав, изучена микроструктура и построены диаграммы фазовых превращений [24–28, 32–34]. Однако для установления более полных закономерностей и особенностей микроструктуры, свойств и фазовых переходов в сплавах на основе

интерметаллида Ni–Mn, которые могут служить аналогами никелида титана как сплава с эффектами памяти формы (ЭПФ), требуется варьировать различные характеристики данных сплавов. Одним из эффективных решений является использование легирующих элементов. В данном случае были выбраны трехкомпонентные сплавы квазибинарных разрезов систем $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-\alpha}\text{Fe}_\alpha$ ($\alpha = 0 \dots 25$) и $\text{Ni}_{50-\beta}\text{Mn}_{50}\text{Fe}_\beta$ ($\beta = 0 \dots 25$). Основанием для такого выбора послужили диаграммы фазовых равновесий, представленные на рис. 1, из которых следует, что данные сплавы испытывают фазовый переход γ (ГЦК) $\leftrightarrow \eta''$ (L10) с параметрами решетки, близкими $a = 0,3731$, $c = 0,3632$ нм [12], и магнитное превращение (см. рис. 1, б) [13].

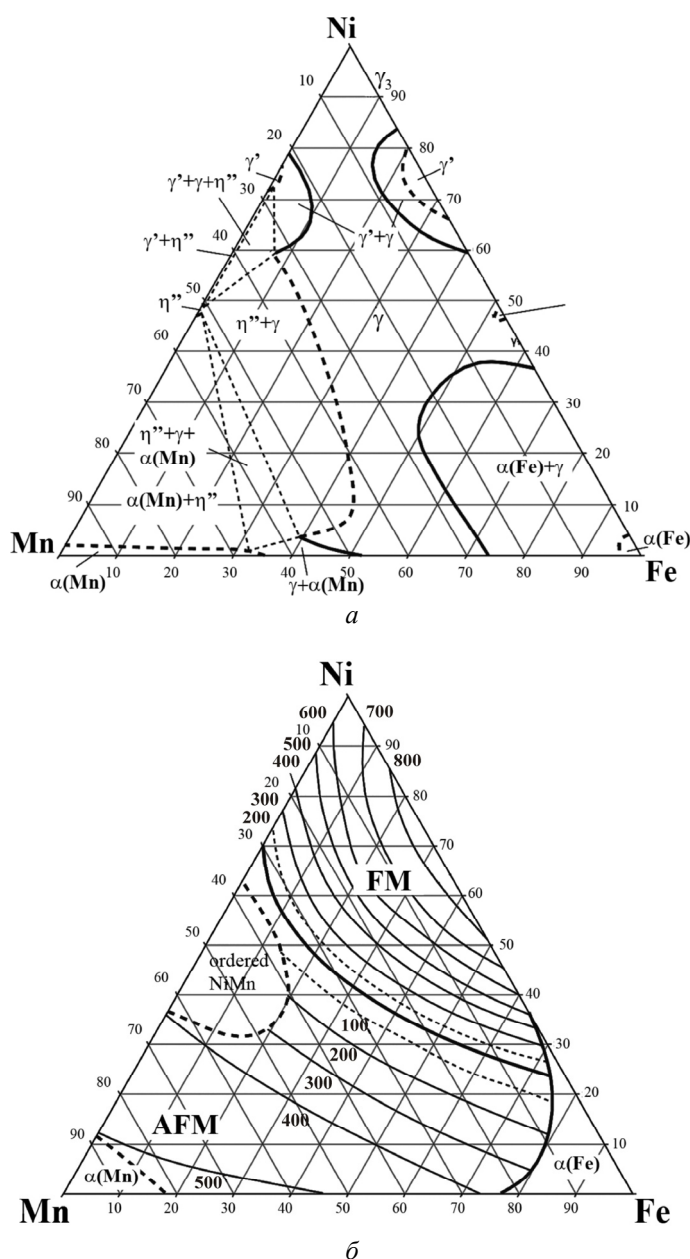


Рис. 1. Расчетная диаграмма Ni–Mn–Fe в проекции изотермического сечения 450 °C (а) и диаграмма магнитных переходов (б) [13]. Значения осей на диаграммах указаны в ат. %

Из литературных данных также известно, что при легировании NiMn железом понижаются значения температуры термоупругих мартенситных превращений (ТМП) при замещении как марганца, так и никеля (табл. 1) [14, 23]. Для сплавов систем Ni–Mn–Ti, Ni–Mn–Al, Ni–Mn–Ga авторами ранее построены диаграммы ТМП [24–28, 32–34].

Таблица 1

Зависимость значений температуры ТМП сплавов от химического и фазового состава

Сплав	e/a	M_s	M_f	A_s	A_f
Ni ₅₀ Mn ₅₀	8,50	970	920	970	1020
Ni ₅₀ Mn ₄₀ Fe ₁₀	8,60	842	789	921	947
Ni ₄₀ Mn ₅₀ Fe ₁₀	8,30	874	835	931	966

По данным структурных исследований сплавы с Al и Ga испытывают каскадные ТМП B2→2M(L1₀)→10M→14M; сплавы, легированные Ti, – B2→2M(L1₀)→10M, в зависимости от содержания третьего элемента, а сплавы, легированные Fe, – единственное ТМП с образованием 2M(L1₀) мартенсита [14, 23]. Установлено, что структура всех мартенситных фаз отличается пакетной морфологией. Результаты измерений микротвердости HV сплавов с Al приведены в табл. 2. Отмечается вначале снижение HV, а затем некоторый рост, коррелирующие с изменением типа структуры мартенсита. В аустенитных сплавах с 24 и 25 ат. % Al тип сверхструктуры изменяется от B2 к L2₁ и микротвердость вновь несколько снижается.

В табл. 2 представлена зависимость величины модуля упругости мартенсита и L2₁-аустенита от химического состава сплавов системы Ni–Mn–Al: с увеличением содержания Al, т.е. при понижении значений температуры ТМП, модуль упругости уменьшается.

Таблица 2

Зависимость микротвердости и модуля упругости от химического и фазового состава

x, ат. % Al	0	10	18	20	22	25
Тип структуры	2M	2M	2M	14M	10M	L2 ₁
HV, ГПа	4,30	3,52	2,90	3,79	3,79	3,10
E, ГПа	66,39	59,37			50,02	43,2

С помощью РЭМ во вторичных электронах был выполнен фрактографический анализ образцов после испытаний до разрушения. На рис. 2, а, б приведены изображения изломов образцов состава

Ni₅₀Mn₄₅Fe₅ и Ni₅₀Mn₃₅Fe₁₅. Видно, что разрушение происходит как по транскристаллитному (в основном по границам зерен), так и по интеркристаллитному типу (в основном по стыкам пакетов мартенситных кристаллов внутри зерна). Это зависит от расположения пакетов мартенситных пластин относительно направления распространения трещины разрушения. Если плоскость пакета расположена вдоль трещины, то происходит хрупкое разрушение (см. рис. 2, а). Такое поведение можно объяснить концентрацией напряжений в определенных областях поликристаллического сплава, особенно вблизи границ зерен. А если трещина развивается перпендикулярно или под углом к габитусу мартенситных пластин пакета, то имеет место хрупко-вязкий характер разрушения (см. рис. 2, б). При большем увеличении на поверхности излома можно наблюдать некоторое количество областей, характеризующих пластинчатым рельефом. Сплавы, легированные алюминием, после отжига разрушались хрупко как в мартенситном (рис. 2, в), так и в аустенитном состоянии (рис. 2, г).

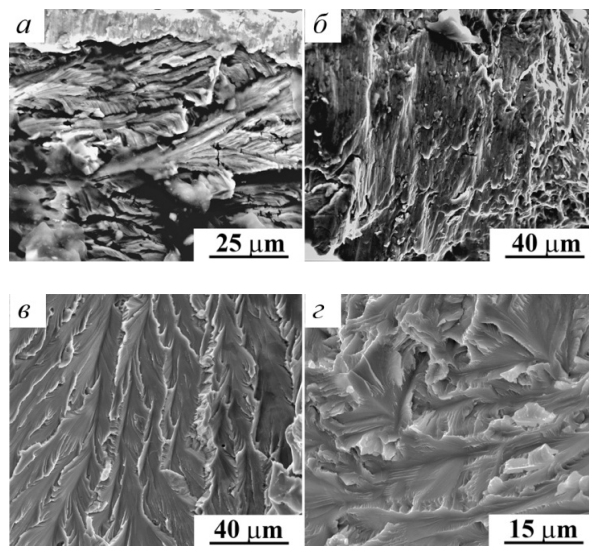


Рис. 2. Фрактография сплавов: а – Ni₅₀Mn₄₅Fe₅, б – Ni₅₀Mn₃₅Fe₁₅, в – Ni₅₀Mn₃₂Al₁₈, г – Ni₅₀Mn₂₅Al₂₅

В преддверии ТМП кубическая аустенитная фаза высокой симметрии обычно испытывает размягчение кристаллической решетки в широком интервале значений температуры на 10–150 К выше температуры начала ТМП, что сопровождается различными аномалиями, которые нетипичны для фазы кубической сингонии [6, 9, 18]. Эти предпериодные аномалии включают появление диффузного рассеяния (тяжей и сателлитов) на дифракционных картинах, характерный твидовый контраст на изображениях, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии (ТЭМ) (рис. 3),

а также аномальное поведение акустических, упругих и других физических свойств (например, анизотропное тепловое расширение, повышенное акустическое затухание, зависимость модулей упругости) [6, 9, 18].

Для сплавов, легированных железом, после выплавки характерна дендритная структура, аустенит имеет ГЦК-структуру с параметром, близким $a = 0,3635$ нм (рис. 4). После термообработки (отжиг $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ + закалка в воду) в сплаве, легированном 5 ат. % Fe, формируется тетрагональный $2M(L1_0)$ -мартенсит с параметрами решетки $a = 0,3720$ нм, $c = 0,3570$ нм, $c/a = 0,96$ (рис. 5). Сплавы, легиро-

ванные Fe, подвергали деформации КВД. Установлено, что в сплавах после такой обработки при комнатной температуре образуется ультрамелкозернистый сильно фрагментированный аустенит с неупорядоченной решеткой ГЦК (A1) с параметром $a = 0,3655$ нм. В этом случае аустенитные сплавы в соответствии с изменениями HV будут отличаться высокими прочностью и пластичностью, особенно по сравнению с литыми сплавами – прототипами. Сплавы, легированные 15 ат. % Fe, при комнатной температуре находились в состоянии аустенита с параметром решетки, близким $a = 0,3635$ нм, независимо от условий внешних воздействий (рис. 6).

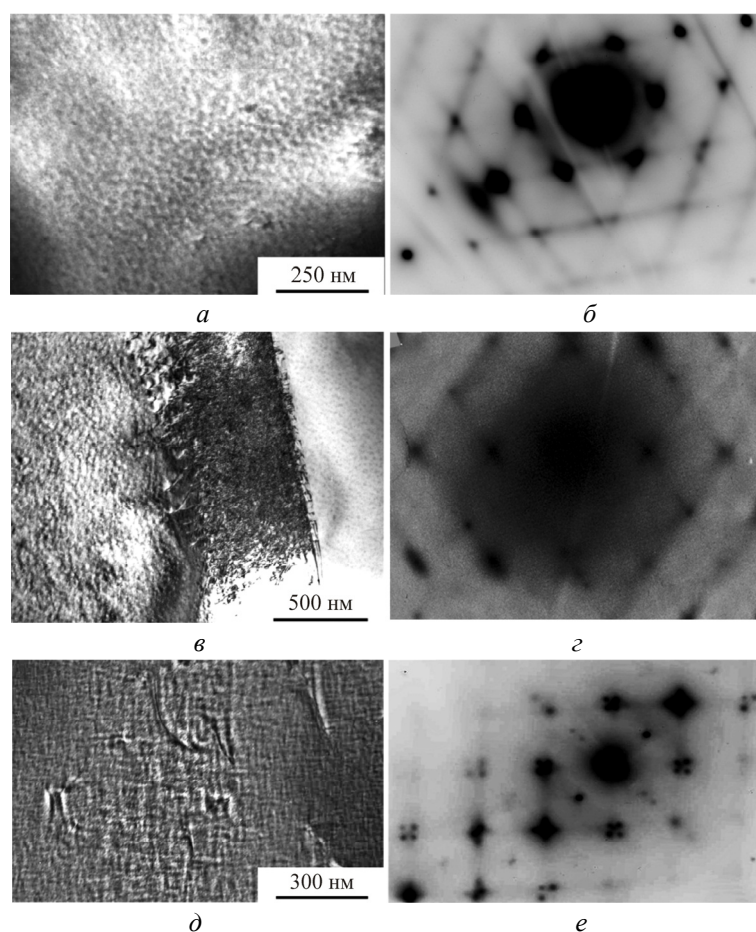


Рис. 3. Изображения (а, в, д) и соответствующие микроэлектронogramмы (б, г, е) сплавов: $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{25}\text{Ti}_{25}$ (а, б), $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{28}\text{Al}_{22}$ (в, г), $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{25}$ (д, е)

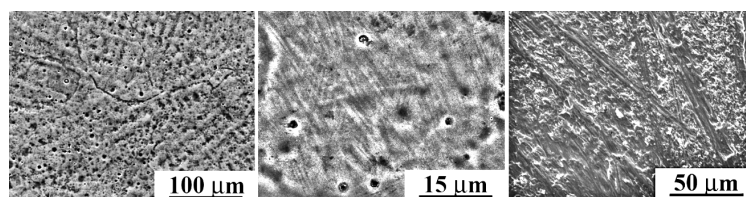


Рис. 4. Микроструктура сплава $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{45}\text{Fe}_5$ в исходном состоянии (а), после отжига (б) и после кручения под высоким давлением 8 ГПа, 1 оборот ($e = 4,66$) (в)

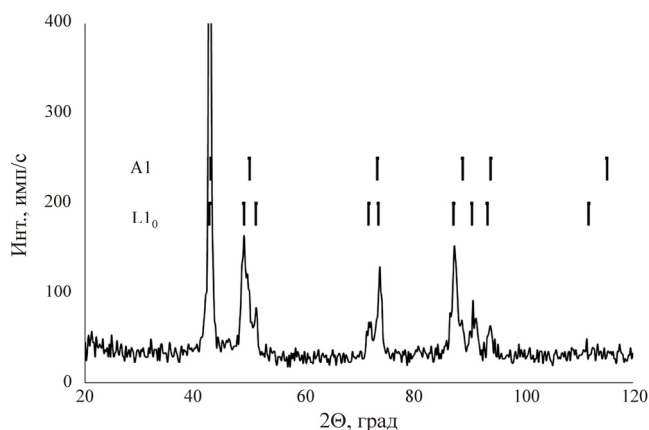


Рис. 5. Рентгеновская дифрактограмма сплава $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{45}\text{Fe}_5$ после ТО (гомогенизирующий отжиг + закалка)

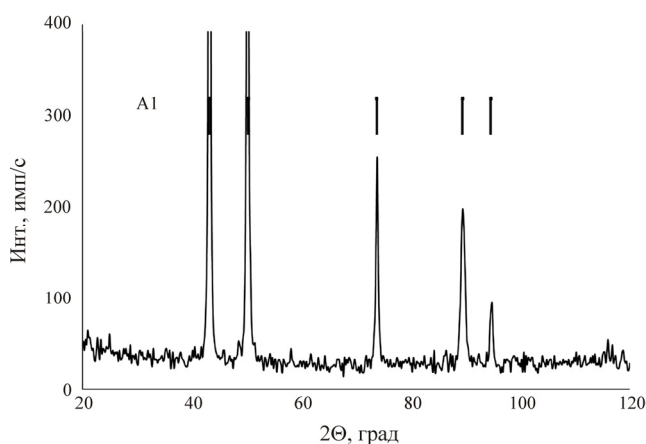


Рис. 6. Рентгеновская дифрактограмма сплава $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{35}\text{Fe}_{15}$ после ТО (гомогенизирующий отжиг + закалка)

Заключение

Таким образом, в работе выполнено сравнительное исследование интерметаллических сплавов с ТМП четырех систем квазибинарного легирования $\text{NiMn} - \text{NiMe}$ ($\text{Me} = \text{Ti}, \text{Al}, \text{Ga}, \text{Fe}$), их структуры, фазовых превращений и свойств. На основании фрактографических изломов можно сделать вывод о лучших ударных свойствах вязкости сплавов с железом.

Работа выполнена в рамках Госзадания (шифр «Структура») г.р. № АААА-А18-118020190116-6 и при поддержке гранта РФФИ 18-32-00529 мол_а.

Список литературы

1. Adachi K., Wayman C.M. Transformation behavior of nearly stoichiometric Ni-Mn alloys // *Met. Trans. A.* – 1985. – Vol. 16. – P. 1567–1579.
2. Adachi K., Wayman C.M. Electron microscopic study of Θ -phase martensite in Ni-Mn alloys // *Met. Trans. A.* – 1985. – Vol. 16. – P. 1581–1597.
3. Потапов П.Л. Мартенситные превращения и высокотемпературный эффект памяти формы в интерме-

таллиде NiMn , легированном Ti // *МитОМ.* – 1993. – № 9. – С. 25–29.

4. New martensite structures and composition dependence of martensitic transformations in $\text{Ni}_{50}\text{Al}_x\text{Mn}_{50-x}$ alloys / T. Inoue, S. Morito, Y. Murakami, K. Oda, K. Otsuka // *Materials Let.* – 1994. – Vol. 19. – P. 33–37.

5. Потапов П.Л., Максимова О.П., Винтайкин Е.З. Фазовый состав и пластичность сплавов с эффектом памяти формы системы Ni-Mn-Ti // *МитОМ.* – 1994. – № 1. – С. 31–34.

6. Пушин В.Г., Кондратьев В.В. Предпереходные явления и мартенситные явления // *ФММ.* – 1994. – Т. 78, № 5. – С. 40–61.

7. The martensitic structure and shape-memory effect in NiMn alloyed by Ti and Al / P.L. Potapov, N.A. Polyakova, V.A. Udovenko, E.L. Svistunova // *Zeitschrift fur Metallkunde.* – 1996. – Vol. 87, iss. 1. – P. 33–39.

8. Kainuma R., Nakano H., Ishida K. Martensitic transformations in NiMnAl β phase alloys // *Metall. and Materials Trans. A.* – 1996. – Vol. 27 A. – P. 4153–4162.

9. Пушин В.Г., Кондратьев В.В., Хачин В.Н. Предпереходные явления и мартенситные превращения / УрО РАН. – Екатеринбург, 1998. – 368 с.

10. Ab initio calculations of structure and lattice dynamics in Ni-Mn-Al shape memory alloys / T. Büsgen,

- J. Feydt, R. Hassdorf, S. Thienhaus, M. Moske, M. Boese, A. Zayak, P. Entel // Phys. Rev. B. – 2004. – Vol. 70. – P. 014111-1–014111-8.
11. Счастливцев В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А. Мартенситное превращение в магнитном поле / УрО РАН. – Екатеринбург, 2007. – 486 с.
12. Mn–Ni (Manganese-Nickel) / A. Watson, Z. Wagner, E. Lysova, E. Rokhlin // MSIT Binary Evaluation Program, in MSIT Workplace: Materials Sci. Int. Serv., GmbH, Stuttgart; Phase Diagram, Phase Relations, Crys. Struct., 13 / ed. By Effenberg, G. Ed., MSI. – 2007. – URL: www.researchgate.net (accessed 4 June 2019).
13. Springer Materials, фазовые диаграммы: офиц. сайт. – URL: <https://materials.springer.com/msi/phase-diagram/> (дата обращения: 9.04.2019).
14. Alvares K., Kim H.Y., Miyazaki S. Effect of alloying elements on microstructure, martensitic transformation and properties of Ni–Mn based alloys // J. Mater. Sci. Technol. – 2009. – Vol. 25, no. 5. – P. 649–654.
15. Кащенко М.П., Чашина В.Г., Вихарев С.В. Динамические модели формирования двойникованных кристаллов. I. Управляющий волновой процесс и снятие вырождения по ориентации двойниковых границ при мартенситных превращениях // ФММ. – 2010. – Т. 110, № 3. – С. 212–222.
16. Кащенко М.П., Чашина В.Г., Вихарев С.В. Динамические модели формирования двойникованных кристаллов. II. Предпереходные состояния и соотношения объемов двойниковых компонент // ФММ. – 2010. – Т. 110, № 4. – С. 323–335.
17. Кащенко М.П., Чашина В.Г. Динамическая модель сверхзвукового роста мартенситных кристаллов // УФН. – 2011. – Т. 181, № 4. – С. 345–364.
18. Лободюк В.А., Коваль Ю.Н., Пушин В.Г. Кристаллоструктурные особенности предпереходных явлений и термоупругих мартенситных превращений в сплавах цветных металлов // ФММ. – 2011. – Т. 111, № 2. – С. 169–194.
19. Особенности мартенситного превращения и тонкая структура интерметаллического соединения $Ni_{50}Mn_{50}$ / В.Г. Пушин, Е.С. Белослудцева, В.А. Казанцев, Н.И. Коуров // Материаловедение. – 2012. – № 11. – С. 3–10.
20. Высокотемпературный эффект памяти формы и термоупругое мартенситное превращение $B2-L1_0$ в интерметаллическом соединении NiMn / В.Г. Пушин, Н.Н. Куранова, Е.Б. Марченкова, Е.С. Белослудцева, В.А. Казанцев, Н.И. Коуров // ЖТФ. – 2013. – Т. 83, вып. 6. – С. 104–113.
21. Кащенко М.П., Чашина В.Г. Ключевая роль двойников превращения при сравнении результатов кристаллогеометрического и динамического анализа для тонкопластинчатого мартенсита // ФММ. – 2013. – Т. 114, № 10. – С. 894–898.
22. Kashchenko M.P., Chashchina V.G. Formation of martensite crystals in the limiting case of a supersonic growth rate // Lett. on Materials. – 2014. – Vol. 4, no. 4. – P. 308–315.
23. Microstructure and phase transformation behavior of Ni–Mn–Fe high-temperature shape memory alloys / W. Cuiping, L. Yuding, Ya. Shuiyuan, L. Xingjun // Materials Sci. Forum. – 2015. – Vol. 833. – P. 63–66.
24. Влияние легирования алюминием на структуру, фазовый состав и термоупругие мартенситные превращения в тройных сплавах Ni–Mn–Al / Е.С. Белослудцева, Н.Н. Куранова, Н.И. Коуров, В.Г. Пушин, В.Ю. Стукалов, А.Н. Уксусников // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, вып. 7. – С. 55–59.
25. Shape memory alloys: properties, technologies, opportunities / ed. by N. Resnina, V. Rubanic. – Plafficon, Switzerland: Trans. Tech. Publications Ltd, 2015. – 642 p.
26. Влияние легирования титаном на структуру, фазовый состав и термоупругие мартенситные превращения в тройных сплавах Ni–Mn–Ti / Е.С. Белослудцева, Н.Н. Куранова, Н.И. Коуров, В.Г. Пушин, А.Н. Уксусников // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, № 9. – С. 71–76.
27. Термоупругие мартенситные превращения в тройных сплавах $Ni_{50}Mn_{50-z}Ga_z$ / Е.С. Белослудцева, Н.Н. Куранова, Е.Б. Марченкова, А.Г. Попов, В.Г. Пушин // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 2. – С. 37–43.
28. Влияние легирования галлием на структуру, фазовый состав и термоупругие мартенситные превращения в тройных сплавах Ni–Mn–Ga / Е.С. Белослудцева, Н.Н. Куранова, Е.Б. Марченкова, А.Г. Попов, В.Г. Пушин // ЖТФ. – 2016. – Т. 86, вып. 4. – С. 69–75.
29. Анализ кристаллографических закономерностей формирования структуры мартенситного пакета интерметаллического соединения NiMn / Ю.В. Хлебникова, Л.Ю. Егорова, Д.П. Родионов, Е.С. Белослудцева, В.А. Казанцев // ЖТФ. – 2016. – Т. 86, вып. 6. – С. 89–99.
30. Kashchenko M.P., Latypov I.F., Chashchina V.G. Correlation of velocities of the waves controlling the thin-plate α -martensite formation and the modulation of the transformation twin structure // Lett. on Materials. – 2017. – Vol. 7, no. 2. – P. 146–150.
31. Kashchenko M.P., Kashchenko N.M., Chashchina V.G. Dynamic options for forming transformation twins // Materials Today: proceedings. – 2017. – Vol. 4. – P. 4605–4610.
32. Features of thermoelastic martensitic, structure and properties in ternary B2-alloys based on NiMn–NiTi, NiMn–NiAl, NiMn–NiGa, $Ni_{50}Mn_{50-z}Ga_z$ quasi-binary systems / E.S. Belosludtseva, N.N. Kuranova, E.B. Marchenkova, V.G. Pushin // Materials Today: proceedings – 2017. – Vol. 4. – P. 4717–4721.
33. Investigation of Intermetallic Alloys Based on Ni–Mn with Controlled Shape Memory Effect Materials / E.S. Belosludtseva, V.G. Pushin, E.B. Marchenkova, A.E. Svirid, A.V. Pushin // Research Proceedings. – 2018. – Vol. 9. – P. 14–18.
34. Пушин В.Г., Белослудцева Е.С., Марченкова Е.Б. Многокомпонентные интерметаллические сплавы на основе Ni–Mn с термо-, механо- и магнитоуправляемыми эффектами памяти формы // ФММ. – 2018. – Т. 119, № 12. – С. 1255–1259.
35. Особенности структуры и фазового состава тройных сплавов квазибинарного разреза NiMn–NiTi / Е.С. Белослудцева, Е.Б. Марченкова, А.В. Пушин, В.Г. Пушин, А.Э. Свирид // Известия вузов. Физика. – 2018. – Т. 61. – P. 103–108.

36. Кашенко М.П., Кашенко Н.М., Чашчина В.Г. Влияние изменения длин волн коротковолновых смещений на формирование фрагмента двойниковой структуры кристаллов α -мартенсита // ФММ. – 2018. – Т. 119, № 1. – С. 3–8.

References

1. Adachi K., Wayman C.M. Transformation behavior of nearly stoichiometric Ni–Mn alloys. *Met. Trans. A.*, 1985, vol. 16, pp. 1567–1579.

2. Adachi K., Wayman C.M. Electron microscopic study of Θ -phase martensite in Ni–Mn alloys. *Met. Trans. A.*, 1985, vol. 16, pp. 1581–1597.

3. Potapov P.L. Martensitnye prevrashcheniia i vysokotemperaturnyi effekt pamiati formy v intermetallide NiMn, legirovannom Ti [Martensitic transformations and high-temperature form memory effect in NiMn intermetallic, Ti alloyed]. *MiTOM*, 1993, no. 9, pp. 25–29.

4. Inoue T., Morito S., Murakami Y., Oda K., Otsuka K. New martensite structures and composition dependence of martensitic transformations in Ni₅₀Al₁xMn_{50–x} alloys. *Materials Lett.*, 1994, vol. 19, pp. 33–37.

5. Potapov P.L., Maksimova O.P., Vintaikin E.Z. Fazovyi sostav i plastichnost' splavov s эффектом памяти формы системы Ni–Mn–Ti [Phase composition and ductility of Ni–Mn–Ti alloys with a memory memory effect]. *MiTOM*, 1994, no. 1, pp. 31–34.

6. Pushin V.G., Kondrat'ev V.V. Predperekhodnye iavleniia i martensitnye iavleniia [Transition and martensitic events]. *FMM*, 1994, vol. 78, no. 5, pp. 40–61.

7. Potapov P.L., Polyakova N.A., Udovenko V.A., Svistunova E.L. The martensitic structure and shape-memory effect in NiMn alloyed by Ti and Al. *Zeitschrift für Metallkunde*, 1996, vol. 87, iss. 1, pp. 33–39.

8. Kainuma R., Nakano H., Ishida K. Martensitic transformations in NiMnAl β phase alloys. *Metall. and Materials Trans. A.*, 1996, vol. 27 A, pp. 4153–4162.

9. Pushin V.G., Kondrat'ev V.V., Khachin V.N. Predperekhodnye iavleniia i martensitnye prevrashcheniia [Transition phenomena and martensitic transformations]. UrO RAN. Ekaterinburg, 1998, 368 p.

10. Büsgen T., Feydt J., Hassdorf R., Thienhaus S., Moske M., Boese M., Zayak A., Entel P. Ab initio calculations of structure and lattice dynamics in Ni–Mn–Al shape memory alloys. *Phys. Rev. B.*, 2004, vol. 70, pp. 014111–014111-8.

11. Schastlivtsev V.M., Kaletina Iu.V., Fokina E.A. Martensitnoe prevrashchenie v magnitnom pole [Martensitic transformation in a magnetic field]. UrO RAN. Ekaterinburg, 2007, 486 p.

12. Watson A., Wagner Z., Lysova E., Rokhlin E. Mn–Ni (Manganese–Nickel). MSIT Binary Evaluation Program, in MSIT Workplace: Materials Sci. Int. Serv., GmbH, Stuttgart; Phase Diagram, Phase Relations, Crys. Struct., 13 nd. Ed. Effenberg, G. Ed., MSI. 2007. URL: www.researchgate.net (accessed 4 June 2019).

13. Springer Materials, fazovye diagrammy: ofits. sait. URL: <https://materials.springer.com/msi/phase-diagram/> (data obrashcheniia: 9.04.2019).

14. Alvares K., Kim H.Y., Miyazaki S. Effect of alloying elements on microstructure, martensitic transformation

and properties of Ni–Mn based alloys. *Journal Mater. Sci. Technol.*, 2009, vol. 25, no. 5, pp. 649–654.

15. Kashchenko M.P., Chashchina V.G., Vikharev S.V. Dinamicheskie modeli formirovaniia dvoynikovannykh kristallov. I. Upravliaiushchii volnovoi protsess i sniatie vyrozhdenniia po orientatsii dvoynikovykh granits pri martensitnykh prevrashcheniiakh [Dynamic models of twin crystal formation. I. Control wave process and removal of degeneracy on orientation of twinned boundaries at martensite transformations]. *FMM*, 2010, vol. 110, no. 3, pp. 212–222.

16. Kashchenko M.P., Chashchina V.G., Vikharev S.V. Dinamicheskie modeli formirovaniia dvoynikovannykh kristallov. II. Predperekhodnye sostoiianiia i sootnosheniia ob'emov dvoynikovykh komponent [Dynamic models of twin crystal formation. II. Pre-transition states and volume ratios of twin components]. *FMM*, 2010, vol. 110, no. 4, pp. 323–335.

17. Kashchenko M.P., Chashchina V.G. Dinamicheskaia model' sverkhzvukovogo rosta martensitnykh kristallov [Dynamic model of supersonic growth of martensitic crystals]. *UFN*, 2011, vol. 181, no. 4, pp. 345–364.

18. Lobodiuk V.A., Koval' Iu.N., Pushin V.G. Kristallostrukturnye osobennosti predperekhodnykh iavlenii i termouprugikh martensitnykh prevrashchenii v splavakh tsvetnykh metallov [Crystal-structural features of pre-transition phenomena and thermoelastic martensitic transformations in non-ferrous metal alloys]. *FMM*, 2011, vol. 111, no. 2, pp. 169–194.

19. Pushin V.G., Belosludtseva E.S., Kazantsev V.A., Kourov N.I. Osobennosti martensitnogo prevrashcheniia i tonkaia struktura intermetallicheskogo soedineniia Ni₅₀Mn₅₀ [Features of martensitic transformation and thin structure of intermetallic compound Ni₅₀Mn₅₀]. *Materiialovedenie*, 2012, no. 11, pp. 3–10.

20. Pushin V.G., Kuranova N.N., Marchenkova E.B., Belosludtseva E.S., Kazantsev V.A., Kourov N.I. Vysokotemperaturnyi effekt pamiati formy i termouprugoe martensitnoe prevrashchenie B2–L10 v intermetallicheskom soedinenii NiMn [High Temperature Shape Memory Effect and Thermal Elastic Martensitic Conversion of B2–L10 into an Intermetallic NiMn Connection]. *ZhTF*, 2013, vol. 83, iss. 6, pp. 104–113.

21. Kashchenko M.P., Chashchina V.G. Kliuchevaia rol' dvoynikov prevrashcheniia pri sravnenii rezul'tatov kristallogometricheskogo i dinamicheskogo analiza dlia tonkoplastinchatogo martensita [The Key Role of Transformation Twins in Comparison of Crystallogometric and Dynamic Analysis Results for Thin Plate Martensite]. *FMM*, 2013, vol. 114, no. 10, pp. 894–898.

22. Kashchenko M.P., Chashchina V.G. Formation of martensite crystals in the limiting case of a supersonic growth rate. *Lett. on Materials.*, 2014, vol. 4, no. 4, pp. 308–315.

23. Cuiping W., Yuding L., Shuiyuan Ya., Ya. Xingjun Ya. Microstructure and phase transformation behavior of Ni–Mn–Fe high-temperature shape memory alloys. *Materials Sci. Forum*, 2015, vol. 833, pp. 63–66.

24. Belosludtseva E.S., Kuranova N.N., Kourov N.I., Pushin V.G., Stukalov V.Iu., Uksusnikov A.N. Vliianie legirovaniia aliuminiem na strukturu, fazovyi sostav i termouprugie martensitnye prevrashcheniia v troinykh splavakh

Ni–Mn–Al [Influence of aluminum alloying on structure, phase composition and thermo-elastic martensitic transformations in triple alloys Ni–Mn–Al]. *ZhTF*, 2015, vol. 85, iss. 7, pp. 55–59.

25. Shape memory alloys: properties, technologies, opportunities. Ed. N. Resnina, V. Rubanic. Plafficon, Switzerland: Trans. Tech. Publications Ltd, 2015, 642 p.

26. Belosludtseva E.S., Kuranova N.N., Kourov N.I., Pushin V.G., Uksusnikov A.N. Vliianie legirovaniia titanom na strukturu, fazovyi sostav i termouprugie martensitnye prevra-shcheniia v troinykh splavakh Ni–Mn–Ti [Influence of titanium alloying on structure, phase composition and thermoelastic martensitic transformations in triple Ni–Mn–Ti alloys]. *ZhTF*, 2015, vol. 85, no. 9, pp. 71–76.

27. Belosludtseva E.S., Kuranova N.N., Marchenkova E.B., Popov A.G., Pushin V.G. Termouprugie martensitnye prevrashcheniia v troinykh splavakh Ni50Mn50–zGaz [Thermoelastic martensitic transformations in triple alloys Ni50Mn50–zGaz]. *Pis'ma v ZhTF*, 2016, vol. 42, iss. 2, pp. 37–43.

28. Belosludtseva E.S., Kuranova N.N., Marchenkova E.B., Popov A.G., Pushin V.G. Vliianie legirovaniia galli- em na strukturu, fazovyi sostav i termouprugie martensitnye prevra-shcheniia v troinykh splavakh Ni–Mn–Ga [Influence of gallium alloying on structure, phase composition and thermoelastic martensitic transformations in triple alloys Ni–Mn–Ga]. *ZhTF*, 2016, vol. 86, iss. 4, pp. 69–75.

29. Khlebnikova Iu.V., Egorova L.Iu., Rodionov D.P., Belosludtseva E.S., Kazantsev V.A. Analiz kristallograficheskikh zakonov formirovaniia struktury martensitnogo paketa intermetallidnogo soedineniia NiMn [The analysis of crystallographic regularities of formation of structure of a martensite package of intermetallidic connection NiMn]. *ZhTF*, 2016, vol. 86, iss. 6, pp. 89–99.

30. Kashchenko M.P., Latypov I.F., Chashchina V.G. Correlation of velocities of the waves controlling the thin-plate α -martensite formation and the modulation of the transformation twin structure. *Lett. on Materials*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 146–150.

31. Kashchenko M.P., Kashchenko N.M., Chashchina V.G. Dynamic options for forming transformation twins. *Materials Today: proceedings*, 2017, vol. 4, pp. 4605–4610.

32. Belosludtseva E.S., Kuranova N.N., Marchenkova E.B., Pushin V.G. Features of thermoelastic martensitic, structure and properties in ternary B2-alloys based on NiMn–NiTi, NiMn–NiAl, NiMn–NiGa, Ni2MnGa–Ni3Ga quasi-binary systems. *Materials Today: proceedings*, 2017, vol. 4, pp. 4717–4721.

33. Belosludtseva E.S., Pushin V.G., Marchenkova E.B., Svirid A.E., Pushin A.V. Investigation of Intermetallic Alloys Based on Ni–Mn with Controlled Shape Memory Effect Materials. *Research Proceedings*, 2018, vol. 9, pp. 14–18.

34. Pushin V.G., Belosludtseva E.S., Marchenkova E.B. Mnogokomponentnye intermetallicheskie splavy na osnove Ni–Mn s termo-, mekhan- i magnitoupravliaemymi effektami pamiati formy [Multi-component Ni–Mn-based intermetallic alloys with thermo, mechanically and magnet-controlled form memory effects]. *FMM*, 2018, vol. 119, no. 12, pp. 1255–1259.

35. Belosludtseva E.S., Marchenkova E.B., Pushin A.V., Pushin V.G., Svirid A.E. Osobennosti struktury i fazovogo sostava troinykh splavov kvazibinarnogo razreza NiMn–NiTi [Features of structure and phase composition of triple alloys of quasi-binary section NiMn–NiTi]. *Izvestiia vuzov. Fizika*, 2018, vol. 61, pp. 103–108.

36. Kashchenko M.P., Kashchenko N.M., Chashchina V.G. Vliianie izmeneniia dlin voln korotkovolnovykh smeshchenii na formirovanie fragmenta dvoynikovoi struktury kristallov α -martensita [Influence of changes in the wavelengths of shortwave displacements on the formation of a fragment of the twin structure of α -martensite crystals]. *FMM*, 2018, vol. 119, no. 1, pp. 3–8.

Получено 27.06.19

Опубликовано 26.09.19

Сведения об авторах

Белослудцева Елена Сергеевна (Екатеринбург, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории цветных сплавов Института физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН; e-mail: ebelosludceva@mail.ru.

Пушин Артемий Владимирович (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории цветных сплавов Института физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН; старший научный сотрудник научной лаборатории конструкционных и функциональных сталей и сплавов Института новых материалов и технологий Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: avpushin@rambler.ru.

Свирид Алексей Эдуардович (Екатеринбург, Россия) – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории цветных сплавов Института физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН; e-mail: svirid2491@rambler.ru.

Пушин Владимир Григорьевич (Екатеринбург, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории цветных сплавов Института физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН; профессор кафедры термообработки и физики металлов Института новых материалов и технологий Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: pushin@imp.uran.ru.

Толмачев Тимофей Павлович (Екатеринбург, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физики высоких давлений Института физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН; e-mail: tolmatchev@imp.uran.ru.

About the authors

Elena S. Belosludtseva (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Laboratory of Non-ferrous Alloys, Institute of Metal Physics named after M.N. Miheev of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: ebelosludceva@mail.ru.

Artemy V. Pushin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Non-Ferrous Alloys, Institute of Metal Physics named after M.N. Miheev of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Senior Researcher, Laboratory of Structural and Functional Steels and Alloys, Institute of New Materials and Technologies of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin; e-mail: avpushin@rambler.ru.

Alexy E. Svirid (Ekaterinburg, Russian Federation) – Graduate Student, Junior Researcher, Laboratory of Non-Ferrous Alloys, Institute of Metal Physics named after M.N. Miheev of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: svirid2491@rambler.ru.

Vladimir G. Pushin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Main Scientific Employee, Laboratory of Non-Ferrous Alloys, Institute of Metal Physics named after M.N. Miheev of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Professor, Department of Heat Treatment and Metal Physics, Institute of New Materials and Technologies of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin; e-mail: pushin@imp.uran.ru.

Timothy P. Tolmachev (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Laboratory of the High Pressure Physics, Institute of Metal Physics named after M.N. Miheev of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: tolmachev@imp.uran.ru.