

**A COMPARATIVE STUDY OF ALLOYS BASED ON THE BINARY  
EQUIATOMIC Ni<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub> ALLOY DOPED WITH 10 AT.% Ti***Elena Sergeevna Belosludtseva<sup>a</sup>, Daniil Evgenievich Vinokurov*

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 18 Sofia Kovalevskaya st, 620108 Yekaterinburg, Russia

<sup>a</sup> ebelosludceva@mail.ru**ABSTRACT**

A large number of studies have been devoted to the study of alloys based on the Ni<sub>2</sub>MnMe system, as they exhibit thermoelastic martensitic transformation (TMT), which provides a shape memory effect, including magnetically controlled. Depending on the alloying composition, the MT temperature can be controlled in this group of alloys. In recent decades, alloys based on the Mn<sub>2</sub>NiMe system, particularly those alloyed with titanium, have begun to be studied. However, insufficient research has been conducted on this alloys to date. The effect of alloying a binary equiatomic alloy of the composition Ni<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub> with 10 at.% titanium by substituting manganese and nickel was investigated. It was found that in both cases, the MT temperatures decrease. For the Ni<sub>50</sub>Mn<sub>40</sub>Ti<sub>10</sub> alloy, M<sub>s</sub> = 510 K, and for the Mn<sub>50</sub>Ni<sub>40</sub>Ti<sub>10</sub> alloy, M<sub>s</sub> = 420 K. The change in microhardness does not correlate with the change in MT. In the first case, it increases slightly, and in the second, it decreases almost 2 times. Using X-ray diffraction analysis (XRD), it was found that in the first alloy only orthorhombic 10M martensite is observed, while in the second, monoclinic 10M martensite and a second phase with hexagonal crystal lattice type are observed. Scanning electron microscopy (SEM) images of the microstructure show a grain structure with packets of martensitic platelets. In the Mn<sub>50</sub>Ni<sub>40</sub>Ti<sub>10</sub> alloy, grains without martensite are additionally observed. Dendritic precipitates are observed within these grains.

**KEYWORDS**Martensite; shape memory alloys; Ni<sub>50</sub>Mn<sub>40</sub>Ti<sub>10</sub>; Mn<sub>50</sub>Ni<sub>40</sub>Ti<sub>10</sub>; microhardness; phase transformations.**СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ БИНАРНОГО  
ЭКВИАТОМНОГО СПЛАВА Ni<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub>, ЛЕГИРОВАННОГО 10 АТ.% Ti***Елена Сергеевна Белослудцева<sup>а</sup>, Даниил Евгеньевич Винокуров*

Институт физики металлов УрО РАН им. М. Н. Михеева, Россия, 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

<sup>а</sup> ebelosludceva@mail.ru**АННОТАЦИЯ**

Изучению сплавов на основе системы Ni<sub>2</sub>MnMe посвящено огромное количество исследований, поскольку в них реализуется термоупругое мартенситное превращение (ТМП),

которое обеспечивает эффект памяти формы, в том числе и магнитоуправляемый. В зависимости от легирования в данной группе сплавов можно регулировать температуру МП. В последние десятилетия начали изучаться сплавы на основе системы  $Mn_2NiMe$ , особенно легированные титаном. Однако исследования сплавов этой группы на данный момент проведены в недостаточном количестве. В работе исследовано влияние легирования 10 ат.% титана на бинарный сплав эквиатомного состава  $Ni_{50}Mn_{50}$  с замещением марганца в одном составе и с замещением никеля – в другом. Установлено, что и в том и в другом случае понижаются температуры МП. Для сплава  $Ni_{50}Mn_{40}Ti_{10}$   $M_s = 510$  К, а для сплава  $Ni_{50}Mn_{40}Ti_{10}$   $M_s = 420$  К. Изменение микротвердости не коррелирует с изменением температуры МП. В первом случае она незначительно повышается, а во втором уменьшается практически в 2 раза. Методом рентгеноструктурного фазового анализа (РСФА) установлено, что в первом сплаве наблюдается только орторомбический 10М-мартенсит, а во втором моноклинный 10М-мартенсит и вторая фаза с гексагональной кристаллической решеткой. На изображениях микроструктуры, полученных методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), представлена зеренная структура с пакетами мартенситных пластин. В сплаве  $Ni_{50}Mn_{40}Ti_{10}$  дополнительно наблюдаются зерна без мартенсита. В них наблюдаются дендритоподобные выделения.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Мартенсит; сплавы с эффектом памяти формы;  $Ni_{50}Mn_{40}Ti_{10}$ ;  $Ni_{50}Mn_{50}Ti_{10}$ ; микротвердость; фазовые превращения.

## Введение

Легированные сплавы на основе бинарной системы Ni–Mn давно и достаточно широко исследуются [1–27]. Поскольку в зависимости от выбранной системы легирования, обладают различными функциональными свойствами. Среди них особенно интересен эффект памяти формы, который может контролироваться температурой, давлением, электрическим и магнитным полями [13, 14, 16, 18].

подавляющее большинство работ посвящены изучению сплавов систем Ni–Mn–Me, в которой, в основном, происходит замещение марганца различными металлами или комплексом химических элементов [1–18] с целью регулирования МП. Однако МП также может наблюдаться в системе с высоким содержанием Mn, даже до 50 ат.%, т. е.  $Mn_2NiGa$ . Он демонстрирует МП вблизи комнатной температуры и отличается от хорошо известного сплава  $Ni_2MnGa$  тем, что показывает гораздо большее отношение  $c/a$  и гораздо более широкий термический гистерезис. В монокристаллическом  $Mn_2NiGa$  наблюдался двусторонний эффект памяти

формы с деформацией 1,7% и управляемый магнитным полем эффект памяти формы до 4,0% [24].

Показано, что в сплавах  $Mn_{50}Ni_{50-x}Me_x$ , легированных оловом, индием и алюминием, температура мартенситного перехода понижается и меняется кристаллическая решетка в зависимости от содержания третьего компонента [25–27]. Установлено, что в сплавах системы  $Ni_{50}Mn_{50-x}Ti_x$  реализуется ТМП, температура которого регулируется за счет легирования титаном. При этом благодаря d-d гибридизации значительно улучшены механические свойства [21–23].

Крайне мало исследований посвящено изучению системы  $Mn_{50}Ni_{50-x}Ti_x$ . В данной работе проведено сравнение ТМП, структуры и микротвердости в двух сплавах  $Ni_{50}Mn_{40}Ti_{10}$  и  $Mn_{50}Ni_{40}Ti_{10}$ .

## 1. Методика исследований

Изготовление исследуемых сплавов осуществлялось в ИФМ УрО РАН. Компоненты использовали высокой степени чистоты: никель, марганец, титан электролитические чистотой 99,99%. Процесс изготовления вклю-

чал электродуговую плавку в среде чистого аргона. Для достижения однородности структуры слитки многократно переплавлялись минимум три раза и проходили длительный вакуумный отжиг при температуре 1173 К. Полученные заготовки были нарезаны на пластинки с использованием электроискрового оборудования, после чего подвергались дополнительному отжигу в фазовом состоянии  $\beta$  (B2), проводимому при температурах 1073 К продолжительностью полчаса с последующей закалкой в воде. Для подготовки образцов применяли электрохимический метод удаления механических повреждений и полировки в растворе хлорно-уксусного электролита (80% уксусной кислоты и 20% хлорной кислоты) при температуре (+2...+5 °С) и напряжениях 12–15 В, длительность процесса варьировалась от 10 до 20 секунд в зависимости от размера изделия. Катод был выполнен из титановой фольги.

Микротвердость устанавливали на твердомере ПМТ-3 при комнатной температуре по методу восстановленного отпечатка с использованием алмазной пирамиды с усилием 50 г в течение 5 с (десять серии испытаний были выполнены на каждом составе).

Рентгеноструктурный фазовый анализ (РСФА) проводили на дифрактометре PANalytical Empyrean Series 2 с излучением  $\text{Co K}\alpha$  ( $\lambda \approx 0,179$  нм). Структуру образцов, аттестацию химического состава проводили на сканирующем электронном микроскопе Quanta-200 Regasus, оборудованном системой EDS, расположенном в ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН.

## 2. Результаты и их обсуждение

В работе проведены сравнительные исследования сплавов на основе бинарного эквиатомного сплава  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ , легированных 10 ат.% Ti методом замещения марганца и никеля соответственно. Изучено влияние легирования на температуры мартенситного перехода, микротвердость, фазовый состав и

структуру.

Известно, что легирование бинарного эквиатомного сплава  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$  третьим компонентом, как правило, понижает температуры мартенситного превращения [1–27]. Бинарный эквиатомный сплав  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$  ( $e/a = 8,5$ ) после закалки в воде или охлаждении на воздухе находится в мартенситном состоянии с кристаллической решеткой  $L1_0$  ( $a = 0,374$  нм,  $c = 0,352$  нм) [10, 11]. В этом сплаве температура начала мартенситного перехода  $M_s = 970$  К. В работах [11, 14, 15, 17] показано, что легирование титаном понижает это значение. При замещении марганца 10 ат.% Ti ( $e/a = 8,2$ ) температура начала мартенситного перехода составляет  $M_s = 510$  К, при замещении никеля ( $e/a = 7,9$ )  $M_s = 420$  К [20] (рис. 1). Понижение температуры мартенситного перехода связано с повышением концентрации титана, а следовательно с расширением существования аустенитной фазы.

В данной работе показано, что замещение марганца и никеля титаном не одинаково влияет на микротвердость (рис. 1). В случае сплава  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{40}\text{Ti}_{10}$  микротвердость незначительно повышается (около 10%), а в сплаве  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{40}\text{Ti}_{10}$  микротвердость уменьшается практически в 2 раза. Вероятно, такое поведение микротвердости связано с фазовым составом сплава или тонкой структурой.

В работе [11] показано, что сплав  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{40}\text{Ti}_{10}$  при комнатной температуре находился в мартенситном состоянии с многослойной орторомбической кристаллической решеткой 10M ( $a = 0,44$  нм,  $b = 0,27$  нм,  $c = 2,11$  нм). При расшифровке рентгеновской дифрактограммы сплава  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{40}\text{Ti}_{10}$  (рис. 2) установлено, что сплав состоит минимум из двух фаз – моноклинной 10M ( $a = 0,44$  нм,  $b = 0,54$  нм,  $c = 2,14$  нм,  $\beta = 93,26^\circ$ ) и второй фазы с гексагональной кристаллической решеткой ( $a = 0,515$  нм,  $c = 0,855$  нм). Вероятно, она более пластична по отношению к матрице.

Структура исследованных сплавов представлена на рис. 3. Размеры зерен сопоставимы и составляют несколько десятков микрометров. Субструктура зерен представлена

пакетами мартенситных пластин. Причем в одном зерне может быть несколько пакетов. Двухфазный состав сплава  $Mn_{50}Ni_{40}Ti_{10}$  подтверждается при анализе СЭМ-изображений

(рис. 3, б и 4). На рис. 4, а показана структура с зернами, размером около 50 мкм, с крупными выделениями второй фазы. В образце также наблюдаются мелкие включения, рас-

пределенные в теле зерна и по границам.



Рис. 1. Зависимость микротвердости (левая ось ординат) и температуры начала мартенситного превращения (правая ось ординат) от состава/электронной концентрации сплавов системы Ni–Mn–Ti

Fig. 1. Dependence of microhardness (left ordinate axis) and temperature of martensitic transformation start (right ordinate axis) on the composition/electron concentration of Ni–Mn–Ti alloys

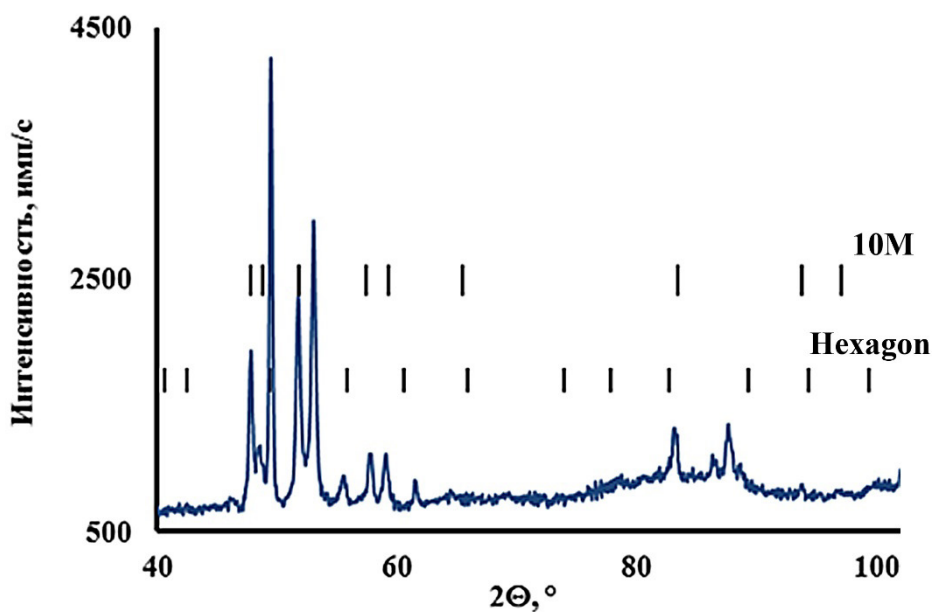


Рис. 2. Рентгенограмма сплава  $Mn_{50}Ni_{40}Ti_{10}$

Fig. 2. X-ray diffraction pattern of  $Mn_{50}Ni_{40}Ti_{10}$  alloy

Структура исследованных сплавов представлена на рис. 3. Размеры зерен сопоставимы и составляют несколько десятков микрометров. Субструктура зерен сплава  $Ni_{50}Mn_{40}Ti_{10}$  представлена пакетами мартен-

ситных пластин (рис. 3, *a*). Причем в одном зерне может быть несколько пакетов. Двухфазный состав сплава  $Mn_{50}Ni_{40}Ti_{10}$  подтверждается при анализе СЭМ-изображений (рис. 3, *б* и 4). На рис. 4, *a* показана структура с зернами размером около 50 мкм с крупными выделениями второй фазы. В образце так-

же наблюдаются мелкие включения, распределенные в теле зерна и по границам.

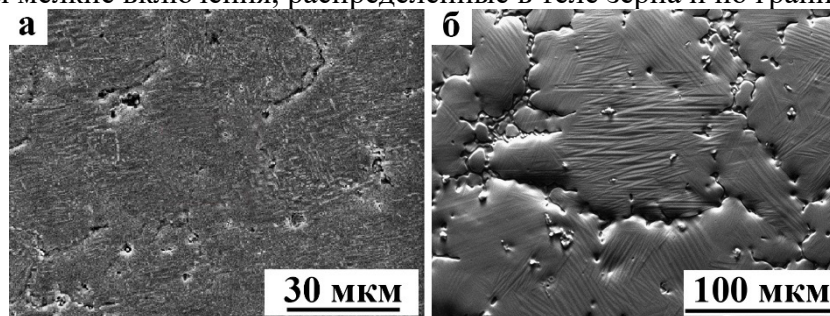


Рис. 3. Типичные электронно-микроскопические изображения структур сплавов:  
*a* –  $Ni_{50}Mn_{40}Ti_{10}$ ; *б* –  $Mn_{50}Ni_{40}Ti_{10}$

Fig. 3. Typical electron microscopic images of the structures of:  
*a* –  $Ni_{50}Mn_{40}Ti_{10}$  alloy; *б* –  $Mn_{50}Ni_{40}Ti_{10}$  alloy

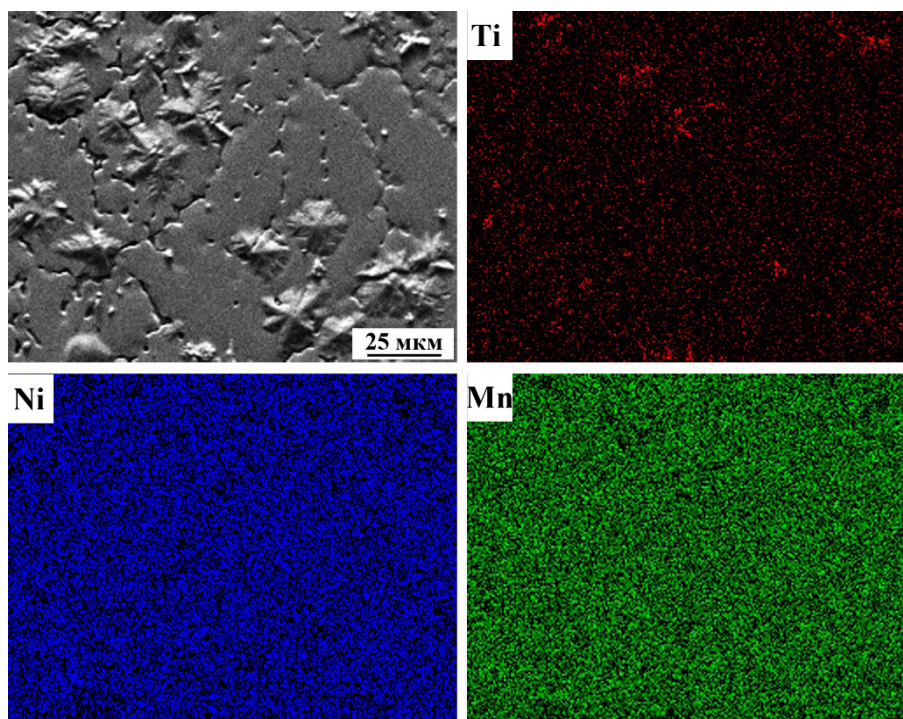


Рис. 4. Данные ЭДС-картирования сплава  $Mn_{50}Ni_{40}Ti_{10}$  в характеристических спектрах химических элементов

Fig. 4. EDS mapping data for the  $Mn_{50}Ni_{40}Ti_{10}$  alloy in the characteristic spectra of chemical elements

Данные ЭДС показали, что марганец и никель равномерно распределены по области исследования. Области, обогащенные титаном, соответствуют мелким включениям. При этом области более крупных образований не отличаются по распределению основных элементов от матрицы и отличаются только морфологией, близкой к дендритной.

### Выводы

1. Легирование бинарного эквивалентного сплава  $Ni_{50}Mn_{50}$  10 ат.% титаном методом замещения марганца либо никеля значительно понижает температуру начала мартенситного перехода.

2. В зависимости от выбранной системы легирования изменяются значения микротвердости. При замещении титаном марганца в сплаве твердость повышается, а в случае замещения титаном никеля – снижается.

3. Структуры сплавов представлены в обоих случаях в основном мартенситной фазой с кристаллической решеткой 10M. В первом случае кристаллическая решетка орторомбическая, во втором – моноклинная. Также во втором сплаве наблюдается вторая фаза с гексагональной кристаллической решеткой.

### Благодарности / Acknowledgments

*Коллектив авторов выражает благодарность Е. С. Кравцову за проведение исследований на дифрактометре PANalytical Empyrean Series 2.*

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

*The authors express their gratitude to E. S. Kravtsov for conducting the research on the PANalytical Empyrean Series 2 diffractometer.*

*This work was carried out as part of a state assignment from the Russian Ministry of Education and Science for the Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang W.S., Mikkola D.E. Shape memory behavior and mechanical properties of NiMn and Ni(Mn,X) alloys // Materials Research Society Symposium – Proceedings. 246, 135–140 (1992). DOI: 10.1557/PROC-246-135.

2. Inoue T., Morito S., Murakami Y., Oda K., Otsuka K. New martensite structures and composition dependence of martensitic transformations in  $Ni_{50}Al_xMn_{50-x}$  alloys // Materials Letters. 19, 33–37 (1994). DOI: 10.1016/0167-577x(94)90101-5.

3. 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. 87(1), 33–39 (1996). DOI: 10.1515/ijmr-1996-870105.

4. Morito S., Otsuka K. Electron microscopy of new martensites with long period stacking order structures in  $Ni_{50}Al_xMn_{50-x}$  alloys I. Structures and morphologies // Materials Science and Engineering. 208, 47–55 (1996). DOI: 10.1016/0921-5093(95)10051-2.

5. Schryvers D., Lahjouji D.E., Sloopmaekers B., Potapov P.L. HREM investigation of martensite precursor effects and stacking sequences in Ni-Mn-Ti alloys // Scripta Materialia, 35(10), 1235–1241 (1996).

6. Schryvers D. Electron microscopy studies of martensite microstructures // Journal of Physics. IV, 7, 109–118 (1997). DOI: 10.1051/jp4:1997517.

7. Lee K.K., Potapov P.L., Song S.Y., Shin M.C. Shape memory effect in NiAl and NiMn based alloys // Scripta Materialia, 36(2), 207–212 (1997). DOI: 10.1016/S1359-6462(96)00363-6.

8. Manosa L., Planes A., Acet M., et al. Magnetic properties and martensitic transitions in annealed  $Ni_{50}Mn_{30}Al_{20}$  // Journal of Applied Physics. 93(10), 8498–8500 (2003). DOI:10.1063/1.1555977.

9. Alvarez K., Kim H.Y., Miyazaki S. Effect of alloying elements on microstructure, martensitic transformation and mechanical properties of Ni-Mn based alloys // Journal of Material Science and Technology. 25(5), 649–654 (2009).

10. Belosludtseva E.S., Kuranova N.N., Kourov N.I., et al. The influence of aluminum alloying on the structure, phase composition and thermo-elastic martensitic transformations in ternary Ni-Mn-Al alloys // Zhurnal Tehnicheskoi Fiziki. 85(9), 55–59 (2015). (In Russian) [Белослудцева Е.С., Куранова Н.Н., Коуров Н.И. и др. Влияние легирования алюминием на структуру, фазовый состав и термоупругие мартенситные превращения в тройных сплавах Ni-Mn-Al // Журнал технической физики, 85(9), 55–59 (2015)]. DOI: 10.1134/S1063784215070075.

11. Belosludtseva E.S., Kuranova N.N., Kourov N.I., et al. Effect of titanium alloying on the structure, the phase composition, and the thermoelastic martensitic transformations in ternary Ni–Mn–Ti alloys // *Zhurnal Tehnicheskoj Fiziki*, 69(9), 1330–1334 (2015). (In Russian) [Белослудцева Е.С., Куранова Н.Н., Коуров Н.И. и др. Влияние легирования титаном на структуру, фазовый состав и термоупругие мартенситные превращения в тройных сплавах Ni–Mn–Ti // *Журнал технической физики*. 85, 71–76 (2015)].
12. Zhang Ch., Zhang Yu., Esling C., et al. Crystallographic features of the martensitic transformation and their impact on variant organization in the intermetallic compound  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{38}\text{Sb}_{12}$  studied by SEM/EBSD // *IUCrJ*. 4, 700–709 (2017). DOI: 10.1107/S2052252517011332.
13. Pushin V.G., Marchenkova E.B., Korolev A.V., et al. Magnetically controlled thermoelastic martensite transformations and properties of a fine-grained  $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{21}\text{Ga}_{25}$  alloy // *Physics of the Solid State*, 59(7), 1321–1331 (2017). (In Russian) [Пушин В.Г., Марченкова Е.Б., Королев А.В. и др. Магнитоуправляемые термоупругие мартенситные превращения и свойства мелкозернистого сплава  $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{21}\text{Ga}_{25}$  // *Физика твердого тела*. 59(7), 1297–1307 (2017)]. DOI: 10.21883/FTT.2017.07.44591.396.
14. Pushin V.G., Belosludtseva E.S., Marchenkova E.B. Multicomponent metallic ni–mn-based alloys with thermally, mechanically, and magnetically controlled shape memory effects // *FMM*. 119(12), 1191–1195 (2018). (In Russian) [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*, 119(12), 1255–1259 (2018)]. DOI: 10.1134/S0015323018120161.
15. Belosludtseva E.S., Marchenkova E.B., Pushin A.V., et al. Peculiarities of structure and phase composition of ternary NiMn–NiTi alloys with a quasi-binary cross-section // *Russian Physics Journal*, 61(12), 2258–2263(2019). (In Russian) [Белослудцева Е.С., Марченкова Е.Б., Пушин А.В. и др. Особенности структуры и фазового состава тройных сплавов квазибинарного разреза NiMn–NiTi // *Известия высших учебных заведений. Физика*, 61(12), 103–108 (2019).] DOI: 10.1007/s11182-019-01664-5.
16. Okulov A.V., Belosludtseva E.S., Kuranova N.N., et al. Multicomponent alloys with thermally, mechanically and magnetically controlled shape memory effects // *Journal of Physics: Conference Series*, 1389, 12098–12105 (2019). (In Russian) [Окулов А.В., Белослудцева Е.С., Куранова Н.Н. и др. Многокомпонентные сплавы с термически, механически и магнитно контролируемыми эффектами памяти формы // *Журнал физики: Серия конференций*, 1389, 12098–12105 (2019)]. DOI: 10.1088/1742-6596/1389/1/012098.
17. Belosludtseva E.S., Pushin A.V., Svirid A.E., et al. Microstructure and properties of alloys with shape memory effects based on ni–mn intermetallide doped with Ti, Al, Ga and Fe // *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science*. 21(3), 33–41 (2019). (In Russian) [Белослудцева Е.С., Пушин А.В., Свирид А.Э. и др. 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*, 21(3), 33–41 (2019)]. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.04.
18. Ma S., Zhang X., Zheng G., et al. Toughening of Ni–Mn-based polycrystalline ferromagnetic shape memory alloys // *Materials*. 16, 5725 (2023). DOI: 10.3390/ma1616572.
19. Markova G.V. Twin structure in Mn–Ni–Ti intermetallic alloys with a thermoelastic martensitic transformation // *Metal Science and Heat Treatment*. 40(3–4), 148–151 (1998). DOI: 10.1007/bf02471770.
20. Wei Z. Y., Liu E. K., Li Y., et al. Magnetostructural martensitic transformations with large volume changes and magneto-strains in all-d-metal Heusler alloys // *Applied Physics Letters*. 109, 071904 (2016). DOI: 10.1063/1.4961382.
21. Sokolovskiy V.V., Buchelnikov V.D., Cong D. Magnetic and structural properties of all-d metal Mn–Ni–Ti Heusler alloys // *Bulletin of the South Ural State University. Mathematics. Mechanics. Physics*. 16(2), 78–85 (2024). (In Russian) [Соколовский В.В., Бучельников В.Д., Конг Д. Магнитные и структурные свойства всех d-металлических сплавов Гейслера Mn–Ni–Ti // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Математика. Механика. Физика*. 16(2), 78–85 (2024)]. DOI: 10.14529/mmph240208.
22. Zhang G., Wang Y., Liu C., et al. Stable long-term elastocaloric effect in Si doped Ni–Mn–Ti polycrystalline alloys with a textured dual-phase microstructure // *Acta Materialia*, 301, 121541 (2025). DOI: 10.1016/j.actamat.2025.121541.
23. Wei Z.Y., Sun W., Shen Q., et al. Elastocaloric effect of all-d-metal Heusler NiMnTi(Co) magnetic shape memory alloys by digital image correlation and infrared thermography // *Applied Physics Letters*. 114, 101903 (2019). DOI: 10.1063/1.5077076.
24. Liu G.D., Chen J.L., Liu Z.H., et al. Martensitic transformation and shape memory effect in a ferromagnetic shape memory alloy:  $\text{Mn}_2\text{NiGa}$  // *Applied Physics Letters*. 87, 262504 (2005). DOI: 10.1063/1.2158507.

25. Xuan H.C., Ma S.C., Cao Q.Q., Wang D.H., Du Y. Martensitic transformation and magnetic properties in high-Mn content  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{50-x}\text{In}_x$  ferromagnetic shape memory alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 509, 5761–5764 (2011). DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.01.073.

26. Ma L., Wang S.Q., Li Y.Z., et al. Martensitic and magnetic transformation in  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{50-x}\text{Sn}_x$  ferromagnetic

shape memory alloys // *Journal of Applied Physics*. 112, 083902 (2012). DOI: 10.1063/1.4758180.

27. Zhao R.B., Zhao D.W., Li G.K., et al. Anomalous magnetic configuration of  $\text{Mn}_2\text{NiAl}$  ribbon and the role of hybridization in the martensitic transformation of  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{50-x}\text{Al}_x$  ribbons // *Applied Physics Letters*. 105, 232404 (2014). DOI: 10.1063/1.4903750.