

**ELECTRON MICROSCOPIC STUDY OF THE MICROSTRUCTURE
OF $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ ALLOY AFTER NATURAL AGING***Elena Sergeevna Belosludtseva^a, Daniil Evgenyevich Vinokurov*Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 18 Sofia Kovalevskaya st., 620108
Ekaterinburg, Russia^a ebelosludceva@mail.ru

ABSTRACT

Recent studies have examined the aging of martensite in shape memory alloys. Due to the widespread use of these compounds, it is necessary to ensure their strength and long-term reliability. Studies of alloys based on the Ni–Mn system are insufficient. In the study of the microstructure of the binary equiatomic alloy of nominal composition $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ after homogenization annealing, quenching and natural aging was studied using scanning and transmission microscopy methods (SEM and TEM). It has been established that as a result of long-term keeping at room temperature, the lamellar twinned martensitic structure dissipates, apparently due to diffusion. Images of the microstructures of the alloy under study are presented: the martensitic matrix and the regions that have experienced phase separation. It is shown that the post-dissipation regions are characterized by their own substructure with individual grains. In this case, some orientations are inherited from the previous martensite. According to TEM studies, their fine structure also differs from the martensite one. Traces of the boundaries of martensite plates are observed, oriented relative to each other at an angle of approximately 70° . In the electron diffraction patterns, both martensite and non-twinned regions show additional reflections and diffuse scattering, probably due to the still unstable state.

KEYWORDS

Phase separation; natural aging; phase transformations; martensite; alloys with shape memory effects.

**ЭЛЕКТРОННОМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$
ПОСЛЕ ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ***Елена Сергеевна Белослудцева^а, Даниил Евгеньевич Винокуров*

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

^a ebelosludceva@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В последние десятилетия изучается старение мартенсита в сплавах с эффектами памяти формы. Поскольку данные сплавы достаточно широко применяются, возникает требование обе-

спечить их долговечность и длительную надежность. Следует отметить, что подобные исследования сплавов на основе системы Ni-Mn проводились в недостаточном количестве. В работе исследована микроструктура бинарного эквиатомного сплава номинального состава $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ после гомогенизационного отжига, закалки и естественного старения методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии (СЭМ и ПЭМ). Установлено, что в результате длительного хранения происходит распад пластинчатой, двойниковой мартенситной структуры, вызванный, по-видимому, диффузией. Представлены изображения микроструктур исследуемого сплава: мартенситной матрицы и областей, испытавших фазовое расслоение. Показано, что области после распада характеризуются собственной субструктурой с отдельными зернами. При этом от предшествующего мартенсита наследуются некоторые ориентации. Согласно ПЭМ-исследованиям, их тонкая структура также отличается от мартенситной. Наблюдаются следы от границ мартенситных пластин, ориентированные по отношению друг к другу под углом примерно 70° . На электронограммах как от мартенсита, так и от недвойникованных областей наблюдаются дополнительные отражения и диффузное рассеяние, обусловленное, вероятно, по-прежнему нестабильным состоянием.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Фазовое расслоение; естественное старение; фазовые превращения; мартенсит; сплавы с эффектами памяти формы.

Введение

Старение мартенсита в сплавах с эффектом памяти формы (СЭПФ) интересует исследователей в последние десятилетия [1–6] поскольку может вызывать стабилизацию мартенсита, а, следовательно, повышение температур фазового превращения, что влияет на функциональные свойства. Как правило, в большинстве сплавов мартенсит метастабилен и имеет тенденцию к распаду на стабильные фазы. Некоторые исследования посвящены управлению процессами распада мартенсита в СЭПФ [3]. Однако до недавнего времени такие исследования сплавов на основе системы Ni – Mn не проводились.

Данная группа сплавов представляет интерес благодаря широкому температурному интервалу реализации термоупругого мартенситного превращения (ТМП) в зависимости от легирования [7, 13–15]. Кроме того, в отличие от сплавов на основе никелида титана, в которых возможно управлять ТМП и ЭПФ за счет воздействия температуры и/или внешних нагрузок [16–18], в сплавах на основе никелида марганца возможно также управление за счет воздействия магнит-

ным полем [13]. Функционирование магнитоуправляемых технических устройств в данном случае реализуется посредством контроля над термоупругим мартенситным превращением и, как следствие, над магнитоуправляемым эффектом памяти формы [12, 13].

Данные сплавы представляют интерес из-за их нескольких технологических применений в качестве магнитных твердотельных хладагентов [7], устройств с магнитным приводом и устройств для спинтроники [8–14].

Известно, что в бинарном эквиатомном сплаве $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ реализуется мартенситное превращение, которое завершается при температуре около 930K [15, 19]. В работах [15, 19] подробно изучена методами электронной микроскопии и описана микроструктура данного сплава при комнатной температуре, рентгеновским методом установлен фазовый состав. Показано, что сплав $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ после закалки находился в однофазном мартенситном состоянии с кристаллической решеткой $L1_0$. Ранее в работе [20] показано, что в результате естественного старения (около 20 лет) в сплаве $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ произошло фазо-

вое расслоение, вызванное перераспределением никеля и марганца. Диффузионным путем образовались области, обогащенные никелем с отклонением от стехиометрии на 2–4 ат.%. В этих областях произошло изменение морфологии от исходной пластинчатой мартенситной к зеренной. Методом рентгеноструктурного фазового анализа не обнаружены фазы с кристаллическими решетками, отличными от кристаллической решетки мартенситной матрицы – $L1_0$. Показано, что температура обратного мартенситного перехода не изменилась в пределах ошибки. При этом произошло изменение значений микротвердости. С целью изучения изменений требуется провести дополнительные исследования, в том числе методом ПЭМ.

Поскольку от любых функционирующих изделий требуется долговечность применения, необходимо проанализировать устойчивость сплава $Ni_{50}Mn_{50}$ к различным изменениям.

1. Методика исследований

Изготовление исследуемых сплавов осуществлялось в ИФМ УрО РАН. Компоненты использовали высокой степени чистоты: никель и марганец электролитические чистотой 99,99%. Процесс изготовления включал 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 β (B2), проводимому при температурах 1073 К, продолжительностью полчаса с последующей закалкой в воде, либо с замедленным охлаждением со скоростью ~ 100 К/ч.

Исследования методом СЭМ проводили на микроскопах MIRA Tescan, оборудованном приставками энергодисперсионного

анализа и дифракции обратнорассеянных электронов, производства Oxford Instruments, расположенном в ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН и Carl Sigma Zeiss VP, оснащенный внутривидеовым детектором, расположенном в НОЦ УрФУ.

ПЭМ-исследования проводили на микроскопах JEM-200CX и JEOL, принадлежащих центру коллективного пользования ИФМ УрО РАН и кафедре термообработки и физики металлов УрФУ, соответственно.

Для подготовки образцов применяли электрохимический метод удаления механических повреждений и полировки в растворе хлорно-уксусного электролита (80% уксусной кислоты и 20% хлорной кислоты) при низкой температуре ($+2...+5$ °C) и напряжениях 12–15 В, длительность процесса варьировалась от 10 до 20 секунд. Катод был выполнен из титановой фольги.

2. Результаты и их обсуждение

Бинарный эквиатомный сплав $Ni_{50}Mn_{50}$ после закалки в воде или охлаждении на воздухе находится в мартенситном состоянии [15, 19] и при комнатной температуре сохраняет структуру в течении длительного времени. В работе [20] показано, что в сплаве $Ni_{50}Mn_{50}$ при длительном хранении происходит изменение микроструктуры, связанное с нарушением мартенситной пластинчатодвойниковой пакетной морфологии. Предположительно, этот эффект обусловлен процессом старения сплава, связанным с начальной термодинамически неравновесной природой мартенситного состояния и постепенным переходом к более стабильной структуре вследствие длительного хранения и достаточной диффузионной подвижности атомов даже при комнатной температуре [21].

Старение обусловлено термодинамической неравновесностью исходного мартенситного состояния и приближением структуры к равновесному состоянию в условиях длительной выдержки и достаточной диффузионной подвижности атомов при комнатной

температуре [21]. В результате диффузионной активности атомов в сплаве сформировались области с содержанием никеля примерно 52–54 ат.%, что является отклонением от стехиометрического состава. Именно в этих областях наблюдается зеренная структура [20].

На рис. 1, а показано выделение второй фазы внутри мартенситной матрицы. Эти области характеризуются собственной субструктурой. Наблюдается множество различающихся по размеру зерен ($\sim 0,5$ –10 мкм). Объемная доля таких образований составляет порядка 18% [20] (их размер составляет ~ 20 –100 мкм). На рис. 1, б показана граница перехода мартенситных пластин и образования новой фазы. Показано, что межфазные границы хорошо протравливаются. Ширина межфазной границы на отдельных участках может составлять до 3 мкм (рис. 1, б). Следует отметить, что происходит разрушение первоначальных пластин мартенсита и формирование отдельных кристаллитов вдоль границ раздела фаз. Показано, что структура границы представлена промежуточным

состоянием. Мартенситные пластины разделились на отдельные кристаллиты, но еще не сформировались в единую структуру. Также наблюдается изменение морфологии пластин на границе мартенситных зерен. На рис. 1, в показана типичная для данного сплава при комнатной температуре структура с первичными пластинами мартенсита, двойникованными по отношению друг к другу и внутренними вторичными нанодвойниками [15, 20], которые ориентированы друг к другу под углом $\sim 70^\circ$ в данной области исследуемого образца. Несмотря на близость к фазовой границе на рис. 1, в не наблюдается заметных морфологических изменений в теле мартенситного зерна. На рис. 1, г показана область с вновь сформировавшейся зеренной структурой при большем увеличении. Межзеренные границы узкие, на отдельных участках наблюдаются «ступени». Вероятно, шаг таких «ступеней» соответствует ширине предшествующих пластин мартенсита. Также внутри зерен наблюдаются полосы – следы от межпластинчатых границ. Угол между ними также составляет $\sim 70^\circ$.

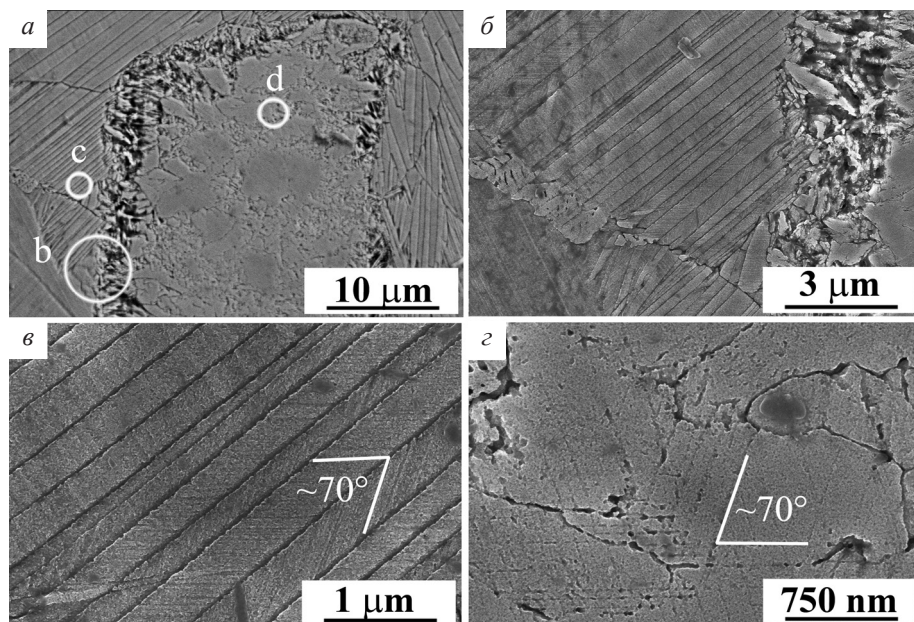


Рис. 1. Типичные СЭМ-изображения микроструктуры сплава $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$, образовавшейся в результате длительного хранения при комнатной температуре

Fig. 1. Typical SEM images of the microstructure of the $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ alloy formed as a result of long-term keeping at room temperature

В работе [20] и на рис. 2 методом ДОРЭ показано, что зерна обладают собственной ориентировкой без выраженной текстуры. Ориентационный анализ недвойникованных областей показал, что образовавшиеся зерна разориентированы по отношению друг к другу с большеугловыми границами. При этом в некоторых случаях сохраняется вытянутая форма. Текстура в них не наблюдается. Следы от мартенситных пластин (рис. 1, *г*), по-видимому, соответствуют плоскости двойникования. Поскольку наследуется угол разориентировки между кристаллитами внутри одного зерна, близкий по значениям углу между соседними двойниками в пределах одного пакета мартенситных пластин, их величина $\sim 86^\circ$ [15] и $\sim 82^\circ$ (рис. 2, *б*), соответственно. Также методом ДОРЭ наблюдаются отдельные идентифицируемые области внутри мартенситной матрицы, от которой фиксируются нулевые решения (черным) вблизи границы раздела.

Можно предположить, что в этих областях произошли структурные изменения, связанные с релаксацией внутренних напряжений в сплаве за весьма значительный временной отрезок. В результате чего образовались недвойникованные зерна с решеткой $L1_0$ [20].

Методом ПЭМ-анализа также обнаружены 2 фазовых состояния: пластинчатое

мартенситное (рис. 3, *а*) и безпластинчатое (рис. 3, *б*) и получены соответствующие микроэлектронограммы (рис. 2, *в*, *г*) исследованного сплава.

Морфология мартенсита сплава после старения заметно отличается от морфологии сплава в исходном состоянии (после гомогенизации и закалки) [15, 19]. Границы между мартенситными пластинами менее выражены. Их геометрия не плоскопараллельна. Межпакетные границы слабо выражены. Внутренняя структура мартенситных пластин менее упорядочена. По-прежнему, сохраняется низкая плотность дислокаций. На электронограмме кроме основных рефлексов обнаружены тяжи и экстрарефлексы.

На рис. 3, *б* и *г* представлены ПЭМ-изображение сплава $Ni_{50}Mn_{50}$ без мартенситных пластин и соответствующая микроэлектронограмма, полученные на микроскопе JEOL JEM-2100. Показано, что структура заметно отличается от двойниковой мартенситной и характеризуется контрастом, подобным твидовому, что типично для предпереходных состояний. Наблюдаются отдельные следы границ мартенситных пластин, ориентированные по отношению друг к другу под углом $\sim 70^\circ$. Плотность дислокаций также незначительна. Рефлексы на электронограмме нечеткие, сопровождающиеся дополнительными рефлексами.

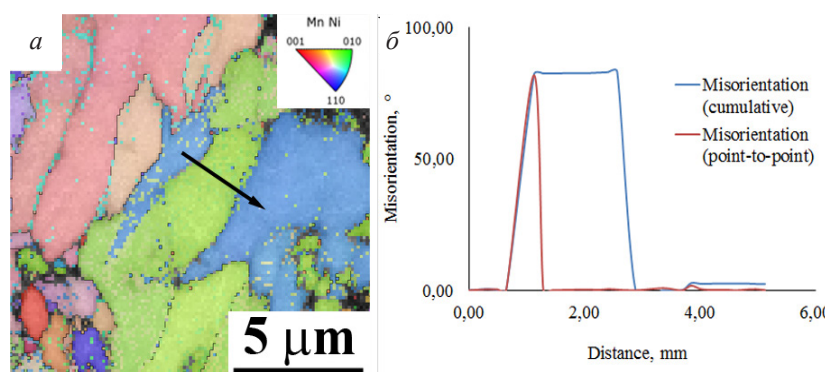


Рис. 2. ДОРЭ-изображения структуры сплава $Ni_{50}Mn_{50}$ после старения (*а*), и график измерений угловых разориентировок (*б*), выполненных по трассе, указанной стрелкой

Fig. 2. EBSD images of the $Ni_{50}Mn_{50}$ alloy structure after aging (*a*), and a graph of angular misorientation measurements (*b*) performed along the path indicated by the arrow

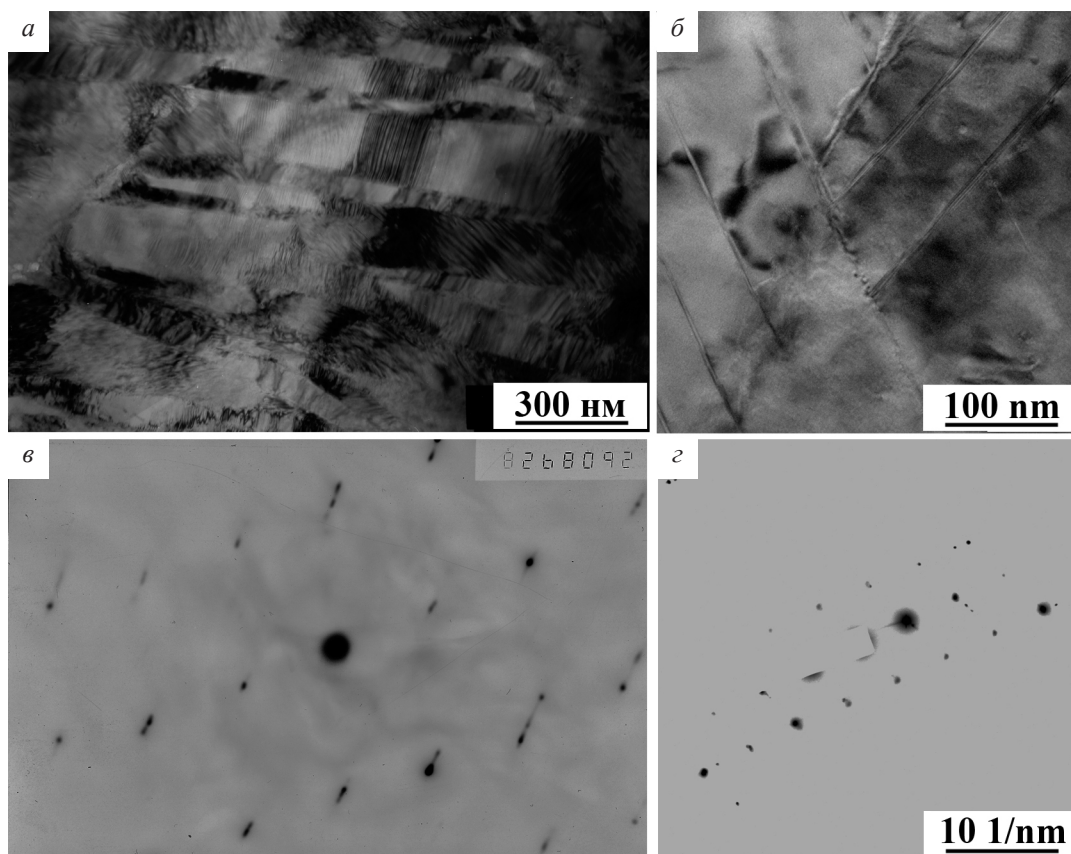


Рис. 3. ПЭМ-изображения микроstructures сплава $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$, образовавшейся в результате естественного старения и соответствующие микроэлектроннограммы

Fig. 3. TEM images of the microstructure of $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ alloy formed as a result of natural aging and the corresponding microelectron diffraction patterns

Выводы

В проделанной работе электронномикроскопически показано, что в результате длительного хранения (более 20 лет) при комнатной температуре в сплаве $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ происходят значительные структурные изменения, вызванные, вероятно, старением мартенсита, обусловленного диффузионными эффектами. Методом ПЭМ показано, что преобразования коснулись в том числе мартенситных областей сплава, которые не наблюдаются методом СЭМ. Установлено, что в превращенных областях в соседних зернах наследуются двойниковые ориентировки от предшествующего пластинчатого попарно двойникового мартенсита.

Благодарности / Acknowledgments

Коллектив авторов выражает благодарность А.С. Вохминцеву за проведение СЭМ исследований на микроскопе CSIGMA VP, Carl Zeiss (НОЦ УрФУ) и М.С. Карабанову за проведение исследований на ПЭМ JEOL JEM-2100 (УрФУ).

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН.

The authors would like to express their gratitude to A.S. Vokhmintsev for carrying out

the SEM study on a Carl Sigma microscope V.P. Zeiss (UrFU Scientific and Educational Center) and M.S. Karabanalov for carrying out the TEM studies on a JEOL JEM-2100 (UrFU).

This work was carried out within the framework of a state assignment from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the Institute of Metallurgical Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The work was carried out using equipment from the Collaborative Access Center (CAC) "Testing Center of Nanotechnology and Advanced Materials" of the Institute of Metallurgical Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Otsuka K., Ren. X. Mechanism of martensite aging effects and new aspects // *Materials Science and Engineering*. 2001. Vol. 312. P. 207–218. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)01877-3.
2. Ren X., Otsuka K. Recent advances in understanding the origin of martensite aging phenomena in shape memory alloys // *Phase Transitions: A*. 1999. Vol. 69. P. 329–350. DOI: 10.1080/01411599908209298.
3. Niendorf T., Krooß P., Somsen C., Eggeler G., Chumlyakov Yu.I., Maierd H.J. Martensite aging – Avenue to new high temperature shape memory alloys // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 89. P. 298–304. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.01.042.
4. Alaneme K.K., Anaele J.U., Okotete E.A. Martensite aging phenomena in Cu-based alloys: Effects on structural transformation, mechanical and shape memory properties: A critical review // *Scientific African*. 2021. Vol. 12(5). Art. e00760. DOI: 10.1016/j.sciaf.2021.e00760.
5. Abu Arab A., Ahlers M. The stabilization of martensite in Cu-Zn-Al alloys // *Acta Metallurgica*. 1988. Vol. 36(9). P. 2627–2638. DOI: 10.1016/0001-6160(88)90207-6.
6. Kadletz P.M., Krooß P., Chumlyakov Yu.I., Gutmann M.J., Schmahl W.W., Maier H.J., Niendorf T. Martensite stabilization in shape memory alloys – experimental evidence for short-range ordering // *Materials Letters*. 2015. Vol. 159. P. 16–19. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.06.048.
7. Siyao Ma. Toughening of Ni-Mn-based polycrystalline ferromagnetic shape memory alloys // *Materials*. 2023. Vol. 16. Art. 5725. DOI: 10.3390/ma16165725.
8. Vas'kovskiy V.O., Moskalev M.E., Lepalovskij V.N., Svalov A.V., Larrañaga A., Balymov K.G., Kulesh N.A. Crystal structure and exchange bias of Ni-Mn-based films // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 777. P. 264–270. DOI:10.1016/j.jallcom.2018.11.016.
9. Moskalev M. E., Kudyukov E. V., Lepalovskij V. N. Vas'kovskiy V.O. Tuning of exchange-biased Ni-Mn/Fe-Ni films with high blocking temperatures // *IEEE Magnetics Letters*. 2019. Vol. 10. Art. 6106705. DOI: 10.1109/LMAG.2019.2943132.
10. Moskalev M.E., Lepalovsky V.N., Naumova L.I., Vaskovskiy V.O. Influence of a permalloy buffer layer on the structural state and hysteresis properties of multilayer FeNi/NiMn/FeNi films // *Izvestia Russkoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya*. 2019. Vol. 83(7). P. 953–955. (in Russian) [Москалев М.Е., Лепаловский В.Н., Наумова Л.И., Васильковский В.О. Влияние буферного слоя пермаллоя на структурное состояние и гистерезисные свойства многослойных пленок FeNi/NiMn/FeNi // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2019ю Т. 83(7). С. 953–955]. DOI: 10.1134/S0367676519070275.
11. Moskalev M.E., Lepalovskij V.N., Yushkov A.A., Kolosov V.Y., Vas'kovskiy V.O. Structural investigation of magnetron sputtered Ta/NixMn100-x/Ta thin films // *Physics, Technologies and Innovation: Proceedings of the V International Young Researchers' Conference*. American Institute of Physics 2015. 2018. Vol. 1. P. 138–139. (In Russian) [Москалев М.Е., Лепаловский В.Н., Юшков А.А., Колосов В.Ю., Васильковский В.О. Структурное исследование магнетронно напыленных тонких пленок Ta/NixMn100-x/Ta // *Физика, технологии и инновации: Материалы V Международной конференции молодых ученых*. Американский институт физики 2015. 2018. Т. 1. С. 138–139].
12. Vasil'ev A.N., Buchel'nikov V.D., Tagaki T., Khovaïlo V.V., Éstrin É.I. Shape memory ferromagnets // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2003. Vol. 173(6). P. 577–606. DOI: 10.3367/UFNr.0173.200306a.0577.
13. Pushin V.G., Marchenkova E.B., Korolev A.V., Kourov N.I., Belosludtseva E.S., Pushin A.V., Uksusnikov A.N. Magnetically controlled thermoelastic martensitic transformations and properties of fine-grained $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{21}\text{Ga}_{25}$ alloy // *Physics of the Solid State*. 2017. Vol. 59. P. 1297–1307. 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 // *Physics of Metals and Metallography*. 2018. Vol. 119. P. 1191–1195. DOI: 10.1134/S0031918X18120165.
15. Belosludtseva E.S. Microstructure, thermoelastic martensitic transformations and properties of B2 alloys based on Ni-Mn: Diss. ... Cand. of Phys.-Math. Sci.: 01.04.07. Ekaterinburg: M.N. Mikheev Institute of Metal

Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017. (In Russian) [Белослудцева Е.С. Микроструктура, термоупругие мартенситные превращения и свойства В2 сплавов на основе Ni-Mn: дис. ... канд. физ. мат. наук: 01.04.07. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2017].

16. Zhuravlev V.N., Pushin V.G. Alloys with thermomechanical memory and their application in medicine. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000. (In Russian) [Журавлев, В.Н., Пушин В.Г. Сплавы с термомеханической памятью и их применение в медицине // Екатеринбург: УрО РАН, 2000].

17. Resnina N., Rubanic V. Shape memory alloys: Properties, technologies, opportunities // Plafficon, Switzerland: Trans Tech publications Ltd, 2015.

18. Pushin V.G., Kuranova N.N., Kourov N.I., Valiev R.Z., Valiev E.Z., Makarov V.V., Pushin A.V., Uksusnikov A.N. Baroelastic shape memory effects in titanium nickelide alloys subjected to plastic deformation under high pressure // Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. 2012. Vol. 82(8). P. 67–65. (In Russian) [Пушин В.Г., Куранова Н.Н., Коуров Н.И., Валиев Р.З., Валиев Э.З., Макаров В.В., Пушин А.В., Уксусников А.Н. Бароупругие эффекты памяти формы в сплавах никелида титана,

подвергнутых пластической деформации под высоким давлением // Журнал технической физики. 2012. Т. 82(8). С. 67–75.] DOI: 10.1134/S106378421208018X.

19. Pushin V.G., Belosludtseva E.S., Kazantsev V.A., Kourov N.I. Features of martensitic transformation and fine structure of the intermetallic compound Ni₅₀Mn₅₀ // Materialovedenie. 2012. Vol. 11. P. 3–10. (In Russian) [Пушин В.Г., Белослудцева Е.С., Казанцев В. А., Коуров Н.И. Особенности мартенситного превращения и тонкая структура интерметаллического соединения Ni₅₀Mn₅₀ // Материаловедение. 2012. Т. 11. С. 3–10].

20. Belosludtseva E.S., Vinokurov D.E. Microstructural and fractographic study of the Ni₅₀Mn₅₀ alloy after low-temperature long-term aging // Materials. Technologies. Design. 2024. Vol. 6. No. 4(19). P. 51–58. (In Russian) [Белослудцева Е.С., Винокуров Д.Е. Исследование сплава Ni₅₀Mn₅₀ после низкотемпературного длительного старения // Materials. Technologies. Design. 2024. Т. 6. № 4(19). С. 51–58]. DOI: 10.54708/26587572_2024_641951.

21. Peteline S., Mehrer H., Huang M.-L., Chang Y.A. Self-diffusion in nickel-manganese alloys // Defect and Diffusion Forum. 2005. Vol. 237–240. P. 352–357. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.237-240.352.