

**STUDY OF THE $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ ALLOY
AFTER LOW-TEMPERATURE LONG-TERM AGING***Elena Sergeevna Belosludtseva^a, Daniil Evgenyevich Vinokurov*

Institute of Metal Physics named after M.N. Mikheyev, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 18 Sofya Kovalevskaya St., 620108, Ekaterinburg, Russia

^a ebelosludtseva@mail.ru

ABSTRACT

The study of alloys based on manganese nickelide is relevant because they implement a thermally and magnetically controlled shape memory effect [1–4]. These alloys can have several technological applications: magnetic solid-state coolants [4], magnetic actuators, sensors and devices for spintronics [5–8]. This work investigates the effect of long-term low-temperature aging on the structure, mechanical properties and temperatures of martensitic transformations of the binary equiatomic alloy $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$. Scanning electron microscopy was used to study the change in the structure and fracture appearance, the distribution of the main chemical elements, and the effect of the structural changes on microhardness values was analyzed. Using resistometry and differential scanning calorimetry, the martensitic transition temperatures were found. It was established that this alloy is susceptible to separation as a result of long-term low-temperature aging (about 20 years). It was shown that a redistribution of basic chemical elements occurs. “Nickelized” regions appear in which the lamellar martensitic structure is disrupted and a fine-grained structure is formed, whose crystal lattice apparently does not change and corresponds to type L10. In this case, the microhardness of the martensitic matrix decreases by 20–25%, and the microhardness of the formed regions is comparable to the microhardness of the alloy in the initial state. It was fractographically established that precipitates with a higher nickel content have a more ductile fracture pattern than the surrounding martensitic matrix. Apparently, the separation did not have a significant effect on the transition temperatures.

KEYWORDS

Decomposition; low-temperature aging; phase transformations; shape memory effects.

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

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

^a ebelosludtseva@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Исследование сплавов на основе никелида марганца актуально тем, что в них реализуется термо- и магнитоуправляемый эффект памяти формы [1–4]. Данные сплавы могут иметь несколько технологических применений: магнитные твердотельные хладагенты [4], магнитные актюаторы, датчики и устройства для спинтроники [5–8]. В работе исследовано влияние длительного низкотемпературного старения на структуру, механические свойства и температуры мартенситных превращений бинарного эквиатомного сплава $Ni_{50}Mn_{50}$. Методами сканирующей электронной микроскопии изучено изменение структуры, характера излома, распределение основных химических элементов, проанализировано влияние структурных изменений на значения микротвердости, методами резистометрии и дифференциальной сканирующей калориметрии определены температуры мартенситных переходов. Установлено, что данный сплав подвержен расслоению в результате длительного низкотемпературного старения (около 20 лет). Показано, что происходит перераспределение основных химических элементов. Появляются «заникеленные» области, в которых нарушается пластинчатая мартенситная и образуется мелкозернистая структура, чья кристаллическая решетка, по-видимому, не меняется и соответствует типу L10. Микротвердость мартенситной матрицы при этом уменьшается на 20–25%, а микротвердость образовавшихся областей сравнима с микротвердостью сплава в исходном состоянии. Фрактографически установлено, что выделения с большим содержанием никеля обладают более вязким характером излома, чем окружающая мартенситная матрица. Судя по всему, расслоение не оказало существенного влияния на температуры переходов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Распад; низкотемпературное старение; фазовые превращения; эффекты памяти формы.

Введение

Как известно, наиболее эффективными являются бинарные сплавы на основе никелида титана, в которых эффекты памяти формы (ЭПФ) реализуются при температурах, близких к комнатной. Тем не менее, развитие техники требует использования сплавов с ЭПФ в более широком температурном интервале. Также значимыми являются возможности управления термоупругими мартенситными превращениями (ТМП), ЭПФ и эффектами сверхупругости не только за счет изменения температуры или внешними механическими усилиями, как для никелида титана [9–11], но и магнитным полем [1–4, 11]. Для получения сплавов с высокотемпературными и магнитоуправляемыми ТМП и ЭПФ, в частности, могут быть использованы сплавы на основе стехиометрического соединения $Ni_{50}Mn_{50}$. Изучение би-

нарных сплавов Ni–Mn началось в середине XX века [12–15]. Однако изучение структурно-фазовых превращений и свойств в таких сплавах в длительном промежутке времени не проводилось. Данные исследования актуальны не только для сплавов на основе системы Ni–Mn, а также для всех материалов, которые планируются к эксплуатации в реальных устройствах.

Данные сплавы представляют интерес из-за их нескольких технологических применений в качестве магнитных твердотельных хладагентов [5], устройств с магнитным приводом и устройств для спинтроники [1–4]. Интерес обусловлен эффектом обменного смещения, наблюдаемым в системах с обменно-связанными антиферромагнитным и ферромагнитным слоями. Поскольку от любых функционирующих изделий требуется долговечность применения, необходи-

мо проанализировать устойчивость сплава $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ к внутренним изменениям в течение длительного времени.

1. Методика исследований

Для исследования были выбран бинарный эквиатомный сплав $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ после закалки и низкотемпературного старения.

Модельные сплавы синтезировали в отделе прецизионных сплавов ИФМ УрО РАН из высокочистых компонентов – электролитического никеля и марганца (чистотой 99,99%). Сплавы выплавляли методом электродуговой плавки в атмосфере очищенного аргона. Для гомогенизации сплавы подвергали многократным переплавам (не менее трех раз) с последующим длительным отжигом в вакууме при температуре 1173 К. Слитки разрезали на электроискровом станке на пластины, которые затем подвергали отжигу в состоянии β (B2)-фазы при температуре 1073 К в течение 30 мин с последующей закалкой в воде или замедленным охлаждением (~100 К/час).

Аттестацию химического состава на шлифах проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Quanta-200 Pegasus, оборудованном рентгеновским энергодисперсионным анализатором фирмы EDAX и системой EBSD (ДОРЭ) для структурного и текстурного анализа, и MIRA Tescan, оборудованном рентгеновским энергодисперсионным анализатором фирмы Oxford Instruments и системой EBSD (ДОРЭ) для структурного и текстурного анализа.

Вначале устраняли микрорельеф от электроискровой резки механической шлифовкой на тонкой наждачной бумаге вручную, а также на ручном шлифовально-полировальном станке MetaServ 250 с полуавтоматической насадкой Vector LC 250. Электрохимическое травление с целью устранения механического наклепа и электрополировку сплавов производили в хлорно-уксусном электролите (80% – уксусная кислота CH_3COOH , 20% – хлорная кислота HClO_4) при температуре плюс 2–5 °С и напряжении 35–37 В)

в течение 10–20 с в зависимости от площади поверхности образца. Катод был выполнен из титановой фольги.

Рентгеноструктурный фазовый анализ проводили на аппарате ДРОН-3М в медном излучении $\text{Cu K}\alpha$ с длиной волны $\lambda = 0,15418$ нм (1,54178 Å), монохроматизированным графитовым кристаллом.

Измерения микротвердости проводились на приборе ПМТ-3. Для определения микротвердости применялся метод восстановленного отпечатка согласно ГОСТ 9450-76.

Для определения температур начала и конца фазовых превращений, а также величины температурного гистерезиса в сплаве $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ в исходном состоянии после закалки применяли метод резистометрии, т.е. определяли температурную зависимость электросопротивления $\rho(T)$. Измерения проводили потенциометрическим четырехконтактным методом по схеме двойного моста при постоянном токе в интервале температур от 100 до 1170 К. Температуры структурных превращений были установлены по методу двух касательных, в соответствии с которыми они определяются в точке их пересечения. Изучение температурной зависимости электросопротивления сплавов проводили совместно в лаборатории низких температур ИФМ УрО РАН.

Для определения критических температур в сплаве $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ после длительного низкотемпературного старения применяли метод дифференциальной сканирующей калориметрии на установке для измерения теплофизических свойств STA 449 C/4/G Jupiter. Температуры обратного мартенситного перехода были также установлены по методу двух касательных.

2. Результаты и их обсуждение

Методом сканирующей электронной микроскопии исследована микроструктура и аттестован химический состав сплава $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ в исходном состоянии после закалки от 1073 К и после длительного низкотемпературного старения.

Установлено, что в состоянии после закалки структура сплава $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ характеризуется зерненным строением. При этом в крупных зернах, как правило, наблюдаются несколько пакетов мартенситных кристаллопластин, расположенных относительно друг друга под разными углами, определяемыми в соответствии с ориентационными

соотношениями, близкими бейновским, а в более мелких его морфология, как правило, однопакетная (рис. 1, *а, б*) [16]. Повышенная травимось границ «бывших» зерен исходной В2-фазы, по данным энергодисперсионного рентгеновского элементного микроанализа, обусловлена наличием дисперсных оксидов и сульфидов марганца [17, 18].

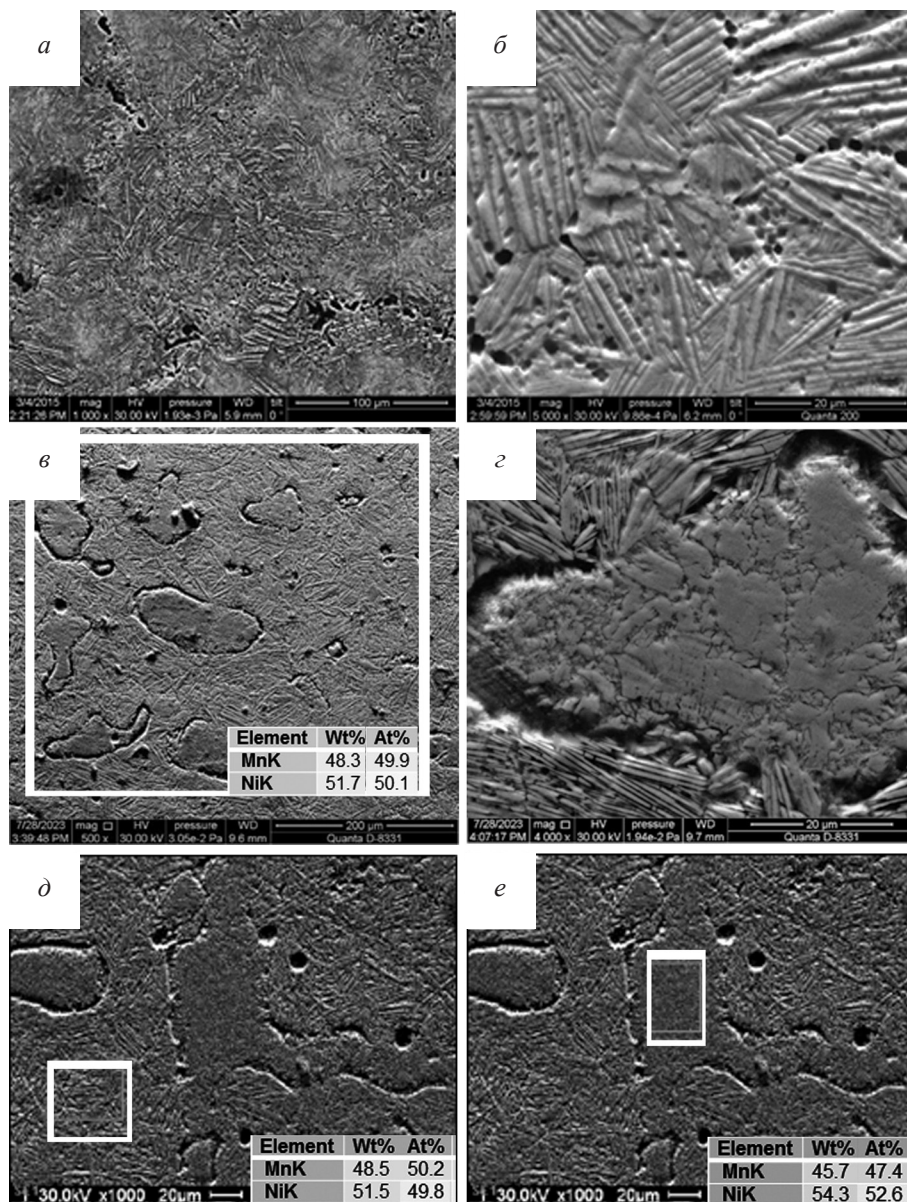


Рис. 1. Типичные СЭМ-изображения микроструктуры сплава $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ в исходном состоянии после закалки (*а, б*), после низкотемпературного старения (*в–е*) и распределение химических элементов по площади (*в*), в отдельных областях (*д, е*)

Fig. 1. Typical SEM images of the microstructure of the $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ alloy in the initial state after quenching (*a, b*), after low-temperature aging (*c–e*) and the distribution of chemical elements over the area (*c*), in separate regions (*d, e*)

Картирование полированной нетравленной поверхности шлифа (рис. 2) сплава $Ni_{50}Mn_{50}$ в характеристических рентгеновских спектрах указанных химических элементов показало, что основные компоненты сплава – никель и марганец распределены равномерно.

В данной работе впервые обнаружено, что в результате естественного старения (примерно 20 лет) произошло фазовое расслоение сплава $Ni_{50}Mn_{50}$ (рис.1, в, г) в результате перераспределения никеля и марганца. Установлено, что в областях выделившейся фазы содержание никеля больше на 2...3 ат.% от стехиометрического состава. Соответственно, в матрице образца наблюдается повышенное содержание марганца (вкладки на рис. 1, д, е).

В результате картирования поверхности шлифа сплава после старения также наблю-

дается неравномерное распределение никеля, сконцентрированного в отдельных областях.

Установлено, что объемная доля выделений составляет около 18%. Их границы плавные, округлые. Субструктура отдельного выделения представлена на рис. 1, г. Показано, что выделение состоит из элементов размерами порядка 1–10 мкм. Возможно, они образуются диффузионным путем в результате нарушения пластинчатой мартенситной структуры. Например, в [19] показано, что в сплаве основе системы Ni–Al установлено, что в результате длительного отжига пластинчатая мартенситная структура исчезает, и образуется равномерное двухфазное состояние. При этом термическое воздействие не оказывает влияния на размер зерна, и образуется дополнительная фаза Ni_5Al_3 .

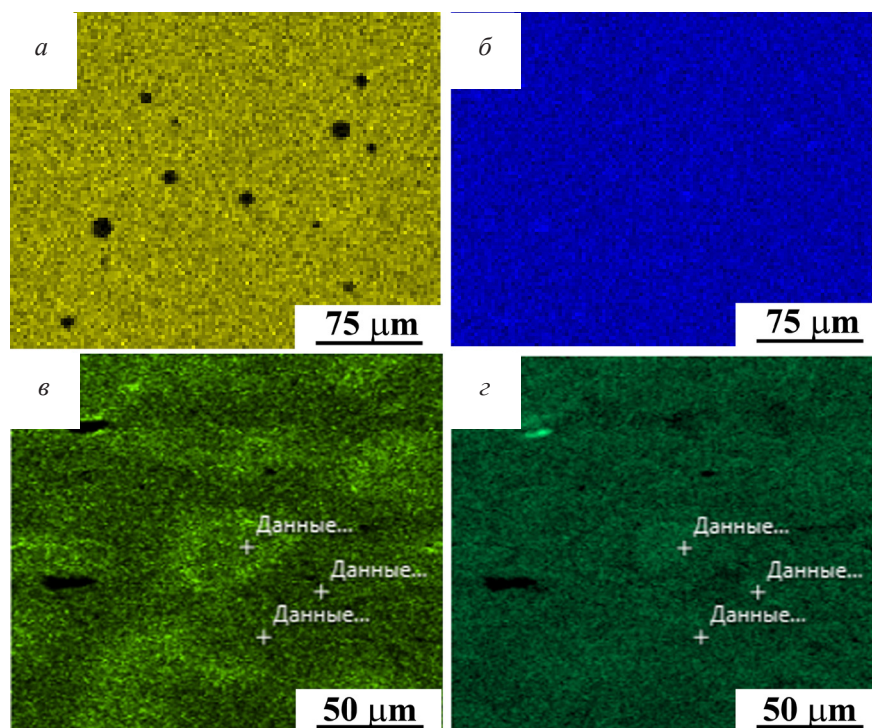


Рис. 2. Картирование поверхности образца сплава $Ni_{50}Mn_{50}$ в характеристических спектрах никеля (а, в) и марганца (б, г) в исходном состоянии после закалки (а, б), после низкотемпературного старения (в, г)

Fig. 2. Mapping of the surface of the $Ni_{50}Mn_{50}$ alloy sample in the characteristic spectra of nickel (а, в) and manganese (б, г) in the initial state after quenching (а, б), after low-temperature aging (в, г)

При РСФА сплава после старения (рис. 3) обнаружены рефлексы только от тетрагональной решетки $L1_0$ с параметрами: $a = 0,372$ нм, $c = 0,354$ нм, $c/a = 0,95$. Эти значения в пределах ошибки совпадают с параметрами решетки в сплаве в исходном состоянии [16, 17]. Рефлексы от других фаз не идентифицированы.

Показано, что микротвердость мартенситной матрицы и образовавшихся

выделений не одинакова (табл. 1, рис. 4). Мартенсит становится менее твердым после перераспределения химических элементов на 25% – 3,13 ГПа, в то время как в исходном состоянии твердость сплава составляла 4,30 ГПа [20]. При этом выделившиеся структурные составляющие имеют значение твердости 4,38 ГПа, близкое к исходному состоянию.

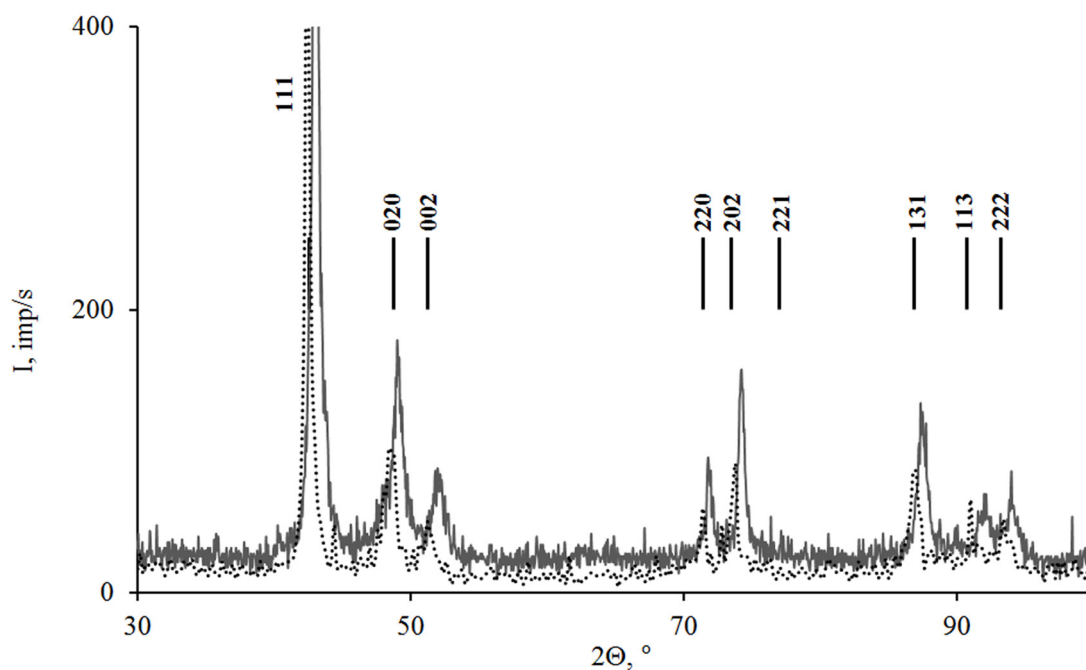


Рис. 3. Типичные фрагменты рентгеновских дифрактограмм фазы с решеткой $L1_0$ в интервале углов дифракции 2θ от 20 до 120° для сплава $Ni_{50}Mn_{50}$ в исходном состоянии (сплошная линия) и после низкотемпературного старения (пунктирная линия)

Fig. 3. Typical fragments of X-ray diffraction patterns of the phase with the $L1_0$ lattice in the range of diffraction angles 2θ from 20 to 120° for the $Ni_{50}Mn_{50}$ alloy in the initial state (solid line) and after low-temperature aging (dashed line)

Таблица 1. Распределение микротвердости в зависимости от фазового состава сплава $Ni_{50}Mn_{50}$

Table 1. Microhardness distribution depending on the phase composition of the $Ni_{50}Mn_{50}$ alloy

Фазовый состав / Phase composition	Значения микротвердости, ГПа / Microhardness values, GPa
Мартенсит, исходное состояние / Martensite, initial state	4,30
Мартенсит, после старения / Martensite, after aging	3,13
Вторая фаза, после старения / Second phase, after aging	4,38

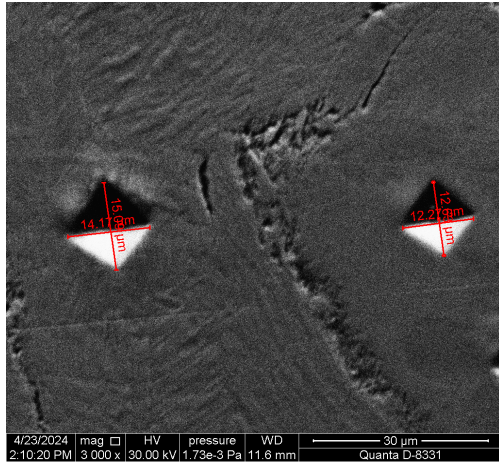


Рис. 4. СЭМ-изображение микроструктуры сплава $Ni_{50}Mn_{50}$ после низкотемпературного старения с отпечатками микротвердости

Fig. 4. SEM image of the microstructure of the $Ni_{50}Mn_{50}$ alloy after low-temperature aging with microhardness imprints

Измерения $\rho(T)$ показали, что мартенситное превращение в исследуемом в данной

работе сплаве $Ni_{50}Mn_{50}$ реализуется в интервале от 920 до 1020 К и сопровождается ростом $\rho(T)$ (рис. 5, а). При нагреве, напротив, величина $\rho(T)$ с характерными температурными гистерезисами изменяется в противоположную сторону. По кривой $\rho(T)$ методом двух касательных были определены критические температуры начала (M_s, A_s) и конца (M_f, A_f) прямого (M_s, M_f) и обратного (A_s, A_f) мартенситного превращения, которые составляют $M_s = 970$ К, $M_f = 920$ К; $A_s = 970$ К, $A_f = 1020$ К (табл. 2).

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии при нагреве образца $Ni_{50}Mn_{50}$ после низкотемпературного длительного старения установлены температуры начала и конца обратного мартенситного превращения $A_s = 980$ К, $A_f = 1040$ К, $\Delta T = 60$ К, что в пределах погрешности совпадает с данными критических точек для этого сплава в исходном состоянии (рис. 5, б, табл. 2).

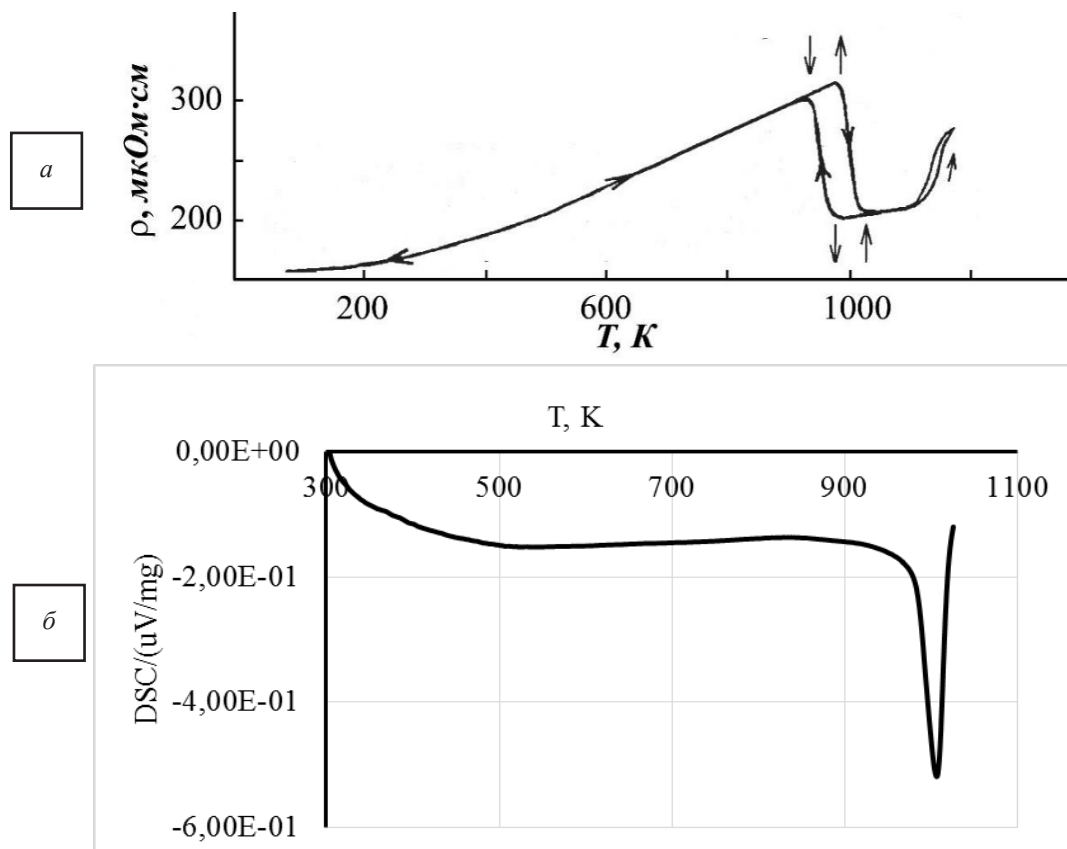


Рис. 5. Температурная зависимость электросопротивления $\rho(T)$ (а) и ДСК (б) сплава $Ni_{50}Mn_{50}$

Fig. 5. Temperature dependence of electrical resistance $\rho(T)$ (а) and DSC (б) of the $Ni_{50}Mn_{50}$ alloy

Таблица 2. Критические температуры мартенситного превращения и гистерезис в сплаве $Ni_{50}Mn_{50}$ по данным измерения электросопротивления, коэффициента линейного расширения и ДСК

Table 2. Critical temperatures of martensitic transformation and hysteresis in the $Ni_{50}Mn_{50}$ alloy according to measurements of electrical resistance, linear expansion coefficient and DSC

Сплав / Alloy	Методы исследования / Study methods	Температуры мартенситных превращений, К / Martensitic transformation temperatures, K				Величина гистерезиса Δ , К / Hysteresis value, K					
		M_s	M_f	A_s	A_f	M_s-M_f	A_s-M_s	A_f-A_s	A_f-M_f	A_f-M_s	A_s-M_f
$Ni_{50}Mn_{50}$	$\rho(T)$	970	920	970	1020	50	0	50	100	50	0
	$\Delta L/L_0(T)$	960	940	970	990	20	10	20	50	30	30
$Ni_{50}Mn_{50}$ после старения / $Ni_{50}Mn_{50}$ after aging	ДСК / DSC			980	1040			60			

Выводы

В заключение отметим, что в течение длительного времени структура сплава $Ni_{50}Mn_{50}$ непостоянна. За период порядка 20 лет в структуре произошли заметные изменения в результате перераспределения никеля. В теле мартенситной матрицы выделились области, в которых не наблюдается пластинчатое мартенситное строение. При этом не наблюдается заметных изменений при РФСА и температур фазового перехода. Очевидны различия в показателях микротвердости. Обнаруженное в настоящей работе явление требует дальнейшего детального изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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*. 119 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 // *Физика металлов и металловедение*. 119 1255-1260 (2018)]. DOI: 10.1134/S0031918X18120165

2. Vasiliev A.N., Buchelnikov V.D., Tagaki T., Khovaylo V.V., Estrin E.I. Ferromagnets with shape memory // *Advances in Physical Sciences*. 173 (6) 577-606 (2003) (in Russian) [Васильев А.Н., Бучельников В.Д., Тагаки Т., Ховайло В.В., Эстрин Э.И. Ферромагнетики с памятью формы // *Успехи физических наук*. 173 (6) 577-606 (2003)].

3. 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 Ni54Mn21Ga25 alloy // *Solid State Physics*. 59 1297-1307 (2017) (in Russian) [Пушин В.Г., Марченкова Е.Б., Королев А.В., Коуров Н.И., Белослудцева Е.С., Пушин А.В., Уксусников А.Н. Магнитоуправляемые термоупругие мартенситные превращения и свойства мелкозернистого сплава Ni54Mn21Ga25 // *Физика твёрдого тела*. 59 1297-1307 (2017)]. DOI: 10.21883/FTT.2017.07.44591.396

4. Siyao Ma, Xuexi Zhang, Guangping Zheng, Mingfang Qian, Lin Geng. Toughening of Ni-Mn-based polycrystalline ferromagnetic shape memory alloys // *Materials*. 16 5725-1 – 5725-20 (2023).

5. Vas'kovskiy V. O., Moskalev M. E., Lepalovskiy 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*. 777 264-270 (2019). (in Russian) [Васьковский В.О., Москалев М.Е., Лепаловский В.Н., Свалов А.В., Ларраньяга А., Балымов К.Г., Кулеш Н.А. Кристаллическая структура и обменное смещение пленок

на основе Ni-Mn // Журнал сплавов и соединений. 777 264–270 (2019).] DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.11.016

6. Moskalev, M. E., Kuduykov, 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. 10 (6106705) 5 (2019). (in Russian) [Москалев М.Е., Кудюков Е.В., Лепаловский В.Н., Васьковский В.О. Настройка обменно-смещенных пленок Ni-Mn/Fe-Ni с высокими температурами блокировки // IEEE Magnetics Letters. 10 (6106705) 5 (2019).] DOI:10.1109/LMAG.2019.2943132

7. Moskalev, M. E., Lepalovsky, V. N., Naumova, L. I. and Vaskovsky, V. O. Influence of a permalloy buffer layer on the structural state and hysteresis properties of multilayer FeNi/NiMn/FeNi films // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya. 83 (7) 953-955 (2019). (in Russian) [Москалев, М. Е., Лепаловский, В. Н., Наумова, Л. И., Васьковский, В. О. Влияние буферного слоя пермаллоя на структурное состояние гистерезисные свойства многослойных пленок FeNi/NiMn/FeNi // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 83 (7) 953-955 (2019)]. DOI:10.1134/S0367676519070275

8. 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 Inc. 2015 (1) 020062 (2018). (in Russian) [Москалев М.Е., Лепаловский В.Н., Юшков А.А., Колосов В.Ю., Васьковский 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 (1) 020062 (2018).] DOI:10.1063/1.5055135

9. 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 // Technical Physics. 57 (8) 1106-1114 (2012). (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. 82 67-75 (2012)]. DOI: 10.1134/S106378421208018X

10. Kuranova N.N., Makarov V.V., Pushin V.G., Ustyugov Y.M. Influence of Heat Treatment and Deformation on the Structure, Phase Transformation, and Mechanical Behavior of Bulk TiNi-Based Alloys // Metals. 12 (12) 2188-2221 (2022). (in Russian) [Куранова Н.Н., Макаров В.В., Пушин В.Г., Устюгов Ю.М.

Влияние термической обработки и деформации на структуру, фазовые превращения и механическое поведение объемных сплавов на основе TiNi // Металлы. 12 (12) 2188-2221 (2022)]. DOI:10.3390/met12122188

11. Pushin V.G., Kuranova N.N., Marchenkova E.B., Pushin A.V. Design and Development of Ti-Ni, Ni-Mn-Ga and Cu-Al-Ni-based Alloys with High and Low Temperature Shape Memory Effects // Materials. 12 (16) 2616-2639 (2019). (in Russian) [Пушин В.Г., Куранова Н.Н., Марченкова Е.Б., Пушин А.В. Проектирование и разработка сплавов на основе Ti-Ni, Ni-Mn-Ga и Cu-Al-Ni с высоко- и низкотемпературным эффектом памяти формы // Материалы. 12 (16) 2616-2639 (2019)]. DOI: 10.3390/ma12162616

12. Kasper J.S., Kouvel J.S. The antiferromagnetic structure of NiMn // J. Phys. Chem. Solids. 11 231-238 (1959). DOI:10.1016/0022-3697(59)90219-7

13. Kren E., Nagy E., Nagy I., Pal L., Szabo P. Structures and phase transformations in the Mn-Ni system near equiatomic concentration // J. Physics and Chemistry of Solids. 29 101-108 (1968). DOI:10.1103/PhysRev.171.574

14. Krasevec V. The complex martensite in quenched NiMn alloy // Phys. stat. sol. (a) 30 241- 250 (1975).

15. Saburi T., Wayman C.M. Crystallographic similarities in shape memory martensites // Acta Metallurgica. 27 979-995 (1979).

16. Khlebnikova Yu.V., Egorova L.Yu., Rodionov D.P., Belosludtseva E.S., Kazantsev V.A. Crystallographic features of the structure of a martensite packet of the NiMn intermetallic compound // Journal of Technical Physics. 61 (6) 887-897 (2016). (in Russian) [Хлебникова Ю.В., Егорова Л.Ю., Родионов Д.П., Белослудцева Е.С., Казанцев В.А. Анализ кристаллографических закономерностей формирования структуры мартенситного пакета интерметаллидного соединения NiMn // Журнал технической физики. 86 99-110 (2016)]. DOI:10.1134/S1063784216060104

17. Pushin V.G., Belosludtseva E.S., Kazantsev V.A., Kourov N.I. Features of martensitic transformation and fine structure of intermetallic compound Ni₅₀Mn₅₀ // Inorganic Materials: Applied Research. 4 340-347 (2013). (in Russian) [Пушин В.Г., Белослудцева Е.С., Казанцев В.А., Коуров Н.И. Особенности мартенситного превращения и тонкая структура интерметаллического соединения Ni₅₀Mn₅₀ // Материаловедение. 11 3-10 (2012)]. DOI:10.1134/S2075113313040084

18. Pushin V.G., Kuranova N.N., Marchenkova E.B., Belosludtseva E.S., Kazantsev V.A., Kourov N.I. High-temperature shape memory effect and the B2-L1₀ thermoelastic martensitic transformation in Ni-Mn intermetallics // Journal of Technical Physics. 58 (6) 878-887 (2013). (in Russian) [Пушин В.Г., Куранова Н.Н., Марченкова Е.Б., Белослудцева Е.С., Казанцев В.А.,

Коуров Н.И. Высокотемпературный эффект памяти формы и термоупругое мартенситное превращение B2-L1₀ в интерметаллическом соединении NiMn // Журнал технической физики. 83 (6) 104-113 (2013).] DOI: 10.1134/S1063784213060236

19. Khadkikar P. S., Vedula K. An investigation of the Ni₅Al₃ phase // Journal of Materials Research. 2 163-167 (1987). DOI:10.1557/JMR.1987.0163

20. Belosludtseva E.S. Microstructure, thermoelastic martensitic transformations and properties of B2 alloys based on Ni-Mn // dis. Ph.D. physical mat. sciences: 01.04.07 IPM Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg. 2017. P.167. (in Russian) [Белослудцева Е.С. Микроструктура, термоупругие мартенситные превращения и свойства B2 сплавов на основе Ni-Mn // дис. канд. физ. мат. наук: 01.04.07 ИФМ УрО РАН, Екатеринбург. 2017. 167 с].