

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.621.2

МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ $\text{Ni}_{51-x}\text{Mn}_{36+x}\text{Sn}_{13}$ ($0 \leq x \leq 4$)

© 2023 г. Ю. В. Калетина^{a, *}, Е. Г. Герасимов^{a, b}, П. Б. Терентьев^{a, b}, А. Ю. Калетин^{a, b}

^aИнститут физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

^bУральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

*e-mail: kaletina@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 31.03.2023 г.

После доработки 29.05.2023 г.

Принята к публикации 07.06.2023 г.

Исследованы структура, электрические и магнитные свойства сплавов на основе системы Ni–Mn–Sn. Установлено, что изменение типа кристаллической решетки в ходе мартенситного превращения сопровождается существенным изменением электросопротивления. Показано, что во всех исследованных сплавах наблюдается отрицательное магнитосопротивление. Максимальная величина магнитосопротивления в магнитном поле 18 кЭ обнаружена в сплаве $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{13}$ и составляет $\approx -45\%$.

Ключевые слова: мартенситное превращение, ферромагнитные сплавы, структура, электросопротивление, магнитосопротивление

DOI: 10.31857/S0015323023600533, **EDN:** ZWIFDW

ВВЕДЕНИЕ

Ферромагнитные сплавы обладают рядом физических свойств и эффектов, которые позволяют получать принципиально новые материалы, перспективные для использования в различных областях современной науки и техники. Интерес к нестехиометрическим ферромагнитным сплавам Гейслера трехкомпонентной системы Ni–Mn–X (X = Sn, Sb, In) связан с наличием в них управляемого магнитным полем структурного перехода, который может сопровождаться эффектом памяти формы, магнитокалорическим эффектом, а также комплексом других практически важных функциональных свойств. Наличие этих свойств позволяют применять такие сплавы для различных многофункциональных приводов, магнитомеханических преобразователей, магнитных коммутационных устройств, в спинтронике, в холодильных устройствах и исполнительных датчиках [1]. В сплавах таких систем наблюдаются структурно-фазовые превращения, и существуют области концен-траций, при которых сосуществуют магнитное упорядочение и мартенситное превращение.

Впервые о мартенситном превращении в ферромагнитных сплавах Гейслера $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{Sn}_x$ с $10 \leq x \leq 25$ сообщали в работе [2]. В работах [3, 4] исследовали мартенситные превращения и магнитные свойства серии сплавов $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{Sn}_x$ с $5 < x < 25$. Позднее появились работы [5–18], в которых изучали магнитные и структурные свой-

ства новых сплавов, магнитокалорический эффект, влияние магнитного поля на микроструктуру и свойства сплавов. Несмотря на проведенные исследования, в настоящее время продолжается поиск таких составов сплавов Ni–Mn–Sn, в которых мартенситное превращение происходит вблизи комнатной температуры, а температура Кюри аустенита остается выше температуры мартенситного превращения. Поэтому изучение сплавов на основе системы Ni–Mn–Sn актуально и имеет перспективное значение для использования их в качестве ферромагнитных сплавов с эффектом памяти формы.

Ранее нами были синтезированы и изучены сплавы системы $\text{Ni}_{51-x}\text{Mn}_{36+x}\text{Sn}_{13}$ ($0 \leq x \leq 4$), определены температуры мартенситного превращения и магнитных переходов [19, 20]. Настоящая работа является продолжением этих исследований, и ее цель – изучение влияния замещения атомов никеля атомами марганца в трехкомпонентных сплавах $\text{Ni}_{51-x}\text{Mn}_{36+x}\text{Sn}_{13}$ ($0 \leq x \leq 4$) на особенности структуры, электросопротивление и магнитосопротивление.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Сплавы $\text{Ni}_{51-x}\text{Mn}_{36+x}\text{Sn}_{13}$ ($0 \leq x \leq 4$) выплавлены методом электродуговой плавки в атмосфере аргона. После выплавки их подвергали гомогенизирующему отжигу при температуре 1123 К в тече-

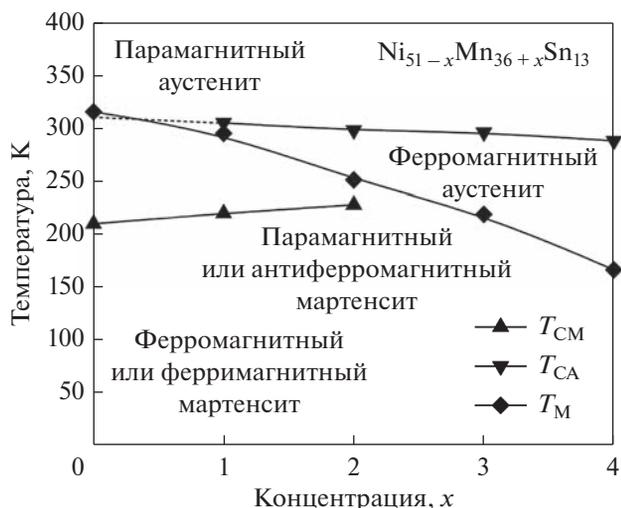


Рис. 1. Концентрационная фазовая диаграмма магнитного и структурного состояния сплавов $Ni_{51-x}Mn_{36+x}Sn_{13}$ ($0 \leq x \leq 4$) [19].

ние 168 ч с последующей закалкой в воду. Из слитков вырезаны образцы для структурных исследований и магнитных измерений.

Структурные исследования выполнены на оптическом микроскопе “Neophot-30” на шлифах после травления. Электронно-микроскопические исследования выполнены на просвечивающем электронном микроскопе JEM-200CX, и сканирующем электронном микроскопе “Quanta-200” с локальным рентгенофлуоресцентным анализом.

Рентгеноструктурные исследования проведены на аппарате ДРОН-6 в излучении $C\alpha$.

Удельное электросопротивление измеряли четырехконтактным методом в диапазоне температур 80–400 К в магнитном поле напряженностью до 18 кЭ. Магнитосопротивление в магнитном поле с напряженностью 18 кЭ $(\Delta\rho/\rho)_H$ вычисляли как

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_H = \frac{\rho(H = 18 \text{ кЭ}) - \rho(H = 0 \text{ кЭ})}{\rho(H = 0 \text{ кЭ})} \times 100\%.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрационная фазовая диаграмма сплавов $Ni_{51-x}Mn_{36+x}Sn_{13}$ ($0 \leq x \leq 4$), построенная нами ранее на основе магнитных измерений и рентгеноструктурного анализа, представлена на рис. 1. На диаграмме показаны температурные области существования аустенитной и мартенситной фаз и их магнитное состояние [19]. Хорошо видно, что в исследованной системе сплавов с уменьшением соотношения Ni/Mn температура мартенситного превращения T_M понижается от 315 К в $Ni_{51}Mn_{36}Sn_{13}$ (Ni/Mn = 1.41, $x = 0$) до 167 К в

$Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$ (Ni/Mn = 1.18, $x = 4$). Температуры Кюри аустенитной (T_{CA}) и мартенситной фаз (T_{CM}) в меньшей степени зависят от соотношения Ni/Mn. Незначительно снижается температура Кюри аустенита T_{CA} и слабо повышается температура Кюри мартенситной фазы T_{CM} с уменьшением соотношения Ni/Mn (т.е. с ростом x от 0 до 4). Следует отметить, что в сплаве $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ температуры T_{CA} и T_M близки, таким образом, совпадение температур мартенситного превращения и магнитного превращения аустенита приводит к единому магнитоструктурному переходу. В сплаве $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ мартенсит можно наблюдать в разных магнитных состояниях как в антиферромагнитном или парамагнитном состоянии, так и в ферро- или ферримагнитном состоянии.

Макро- и микроструктурные исследования сплавов $Ni_{51-x}Mn_{36+x}Sn_{13}$ ($0 \leq x \leq 4$) показали, что после отжига при температуре 1123 К все сплавы имели крупнозернистую поликристаллическую структуру (рис. 2а, 2б). При комнатной температуре сплавы $Ni_{49}Mn_{38}Sn_{13}$, $Ni_{48}Mn_{39}Sn_{13}$, $Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$ находились в однофазном состоянии, в них наблюдали только аустенитную фазу (рис. 2). В структуре сплавов $Ni_{51}Mn_{36}Sn_{13}$ и $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ кроме аустенитной фазы присутствуют кристаллы мартенсита (рис. 2в–2д). На полированной поверхности шлифов сплавов $Ni_{51}Mn_{36}Sn_{13}$ и $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ отчетливо выявляется мартенситный рельеф, повторяющий форму кристаллов. Мартенситные кристаллы имеют клиновидную форму или форму реек, преимущественно с параллельными границами. Рейки мартенсита группируются в пакеты, длинные оси кристаллов располагаются параллельно друг другу. Внутри отдельных мартенситных кристаллов наблюдается характерная внутренняя структура подобная двойникам (рис. 2д).

Температурные зависимости удельного электросопротивления $\rho(T)$ сплавов, измеренные при нагреве и охлаждении, представлены на рис. 3. Кривые имеют вид, характерный для сплавов Ni–Mn–X, претерпевающих мартенситное превращение [21–24]. С повышением температуры от 80 К до температуры обратного мартенситного превращения T_M наблюдается небольшое уменьшение удельного электросопротивления от 2.15 до 2.05 мкОм м для сплава $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$, от 2.5 до 2.4 мкОм м для сплава $Ni_{49}Mn_{38}Sn_{13}$, от 1.93 до 1.88 мкОм м для сплава $Ni_{48}Mn_{39}Sn_{13}$ и от 2.38 до 2.28 мкОм м для сплава $Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$. При дальнейшем нагреве в интервале мартенситного превращения в области температуры T_M для всех сплавов наблюдается резкое изменение электросопротивления. Так, электросопротивление в сплаве $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ понижается от 2.05 до 1.19 мкОм м, в сплаве $Ni_{49}Mn_{38}Sn_{13}$ – от 2.4 до 1.45 мкОм м, в сплаве $Ni_{48}Mn_{39}Sn_{13}$ – от 1.88 до 1.05 мкОм м, в сплаве

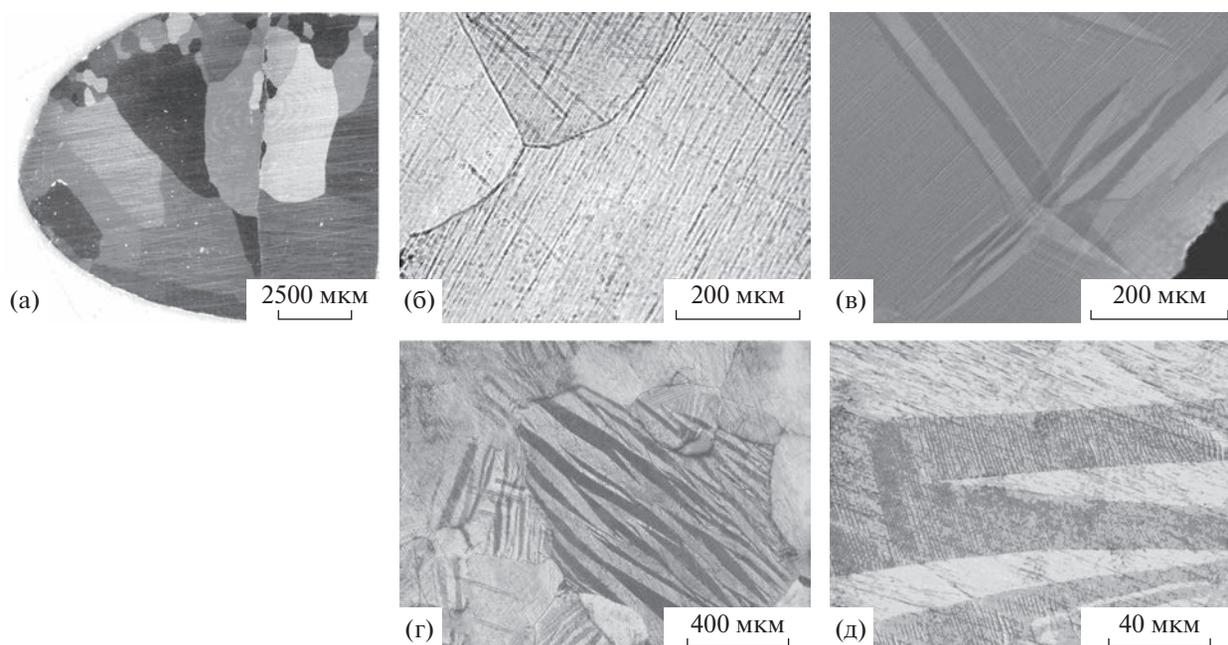


Рис. 2. Структура исследуемых сплавов: макроструктура $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{13}$ (а), микроструктура $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{38}\text{Sn}_{13}$ (б), рельеф мартенсита в сплаве $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{37}\text{Sn}_{13}$ (в), структура сплава $\text{Ni}_{51}\text{Mn}_{36}\text{Sn}_{13}$ (г, д).

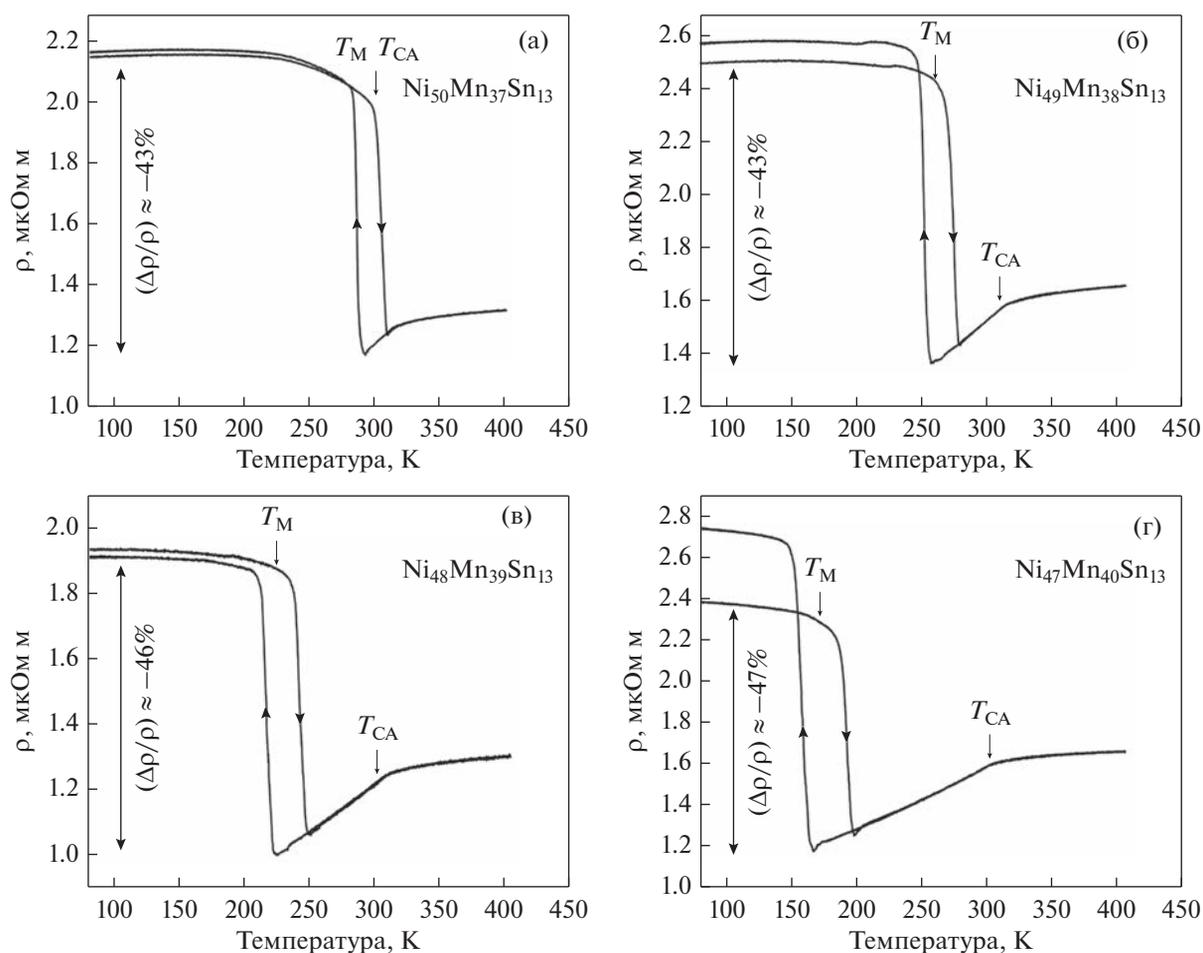


Рис. 3. Температурные зависимости удельного электросопротивления сплавов, измеренные в нулевом магнитном поле: $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{37}\text{Sn}_{13}$ (а), $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{38}\text{Sn}_{13}$ (б), $\text{Ni}_{48}\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{13}$ (в) и $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{13}$ (г).

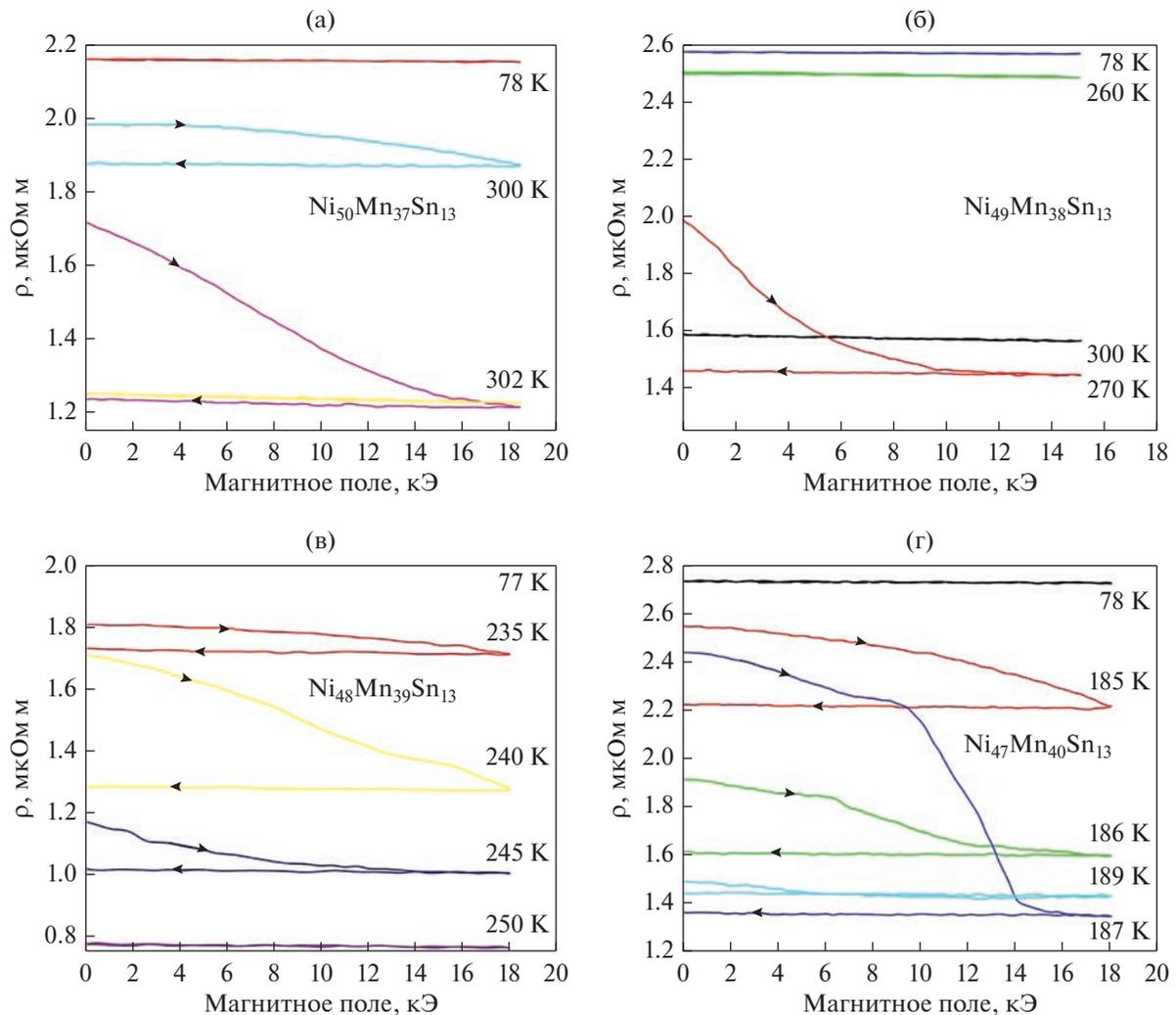


Рис. 4. Зависимости удельного электросопротивления ρ исследованных сплавов от напряженности магнитного поля при различных температурах: $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{37}\text{Sn}_{13}$ (а), $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{38}\text{Sn}_{13}$ (б), $\text{Ni}_{48}\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{13}$ (в) и $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{13}$ (г).

$\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{13}$ – от 2.28 до 1.65 мкОм м. Наблюдаемое изменение электросопротивления происходит в интервале мартенситного превращения и связано с изменением структуры сплавов от мартенситной при $T < T_M$ к аустенитной при $T > T_M$. При нагреве выше T_M с последующим ростом температуры электросопротивление увеличивается. Во всех сплавах на зависимостях $\rho(T)$ в области температуры Кюри аустенита T_{CA} наблюдается перегиб, обусловленный исчезновением магнитного вклада в электросопротивление при температурах выше T_{CA} .

Проведена оценка максимального относительного изменения удельного электросопротивления

$$\Delta\rho/\rho = 100\%(\rho(T > T_M) - \rho(T < T_M))/\rho(T < T_M)$$

при спонтанном мартенситном превращении. Максимальное относительное изменение удельно-

го электросопротивления $\Delta\rho/\rho$ составляет $\approx -43\%$ для сплава $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{37}\text{Sn}_{13}$, $\approx -43\%$ для $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{38}\text{Sn}_{13}$, $\approx -46\%$ для сплава $\text{Ni}_{48}\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{13}$ и $\approx -47\%$ для $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{13}$. Таким образом, в ходе мартенситного превращения наблюдается значительное изменение электрического сопротивления, связанное с изменением типа кристаллической решетки. Наблюдается хорошее соответствие температур мартенситного и магнитного переходов с изменением амплитудной магнитной восприимчивости сплавов $\chi_{ac}(T)$ в зависимости от температуры, измеренными нами ранее [19]. Температурные зависимости удельного электросопротивления $\rho(T)$ похожи на аналогичные зависимости в сплавах $\text{Ni}_{47-x}\text{Mn}_{42+x}\text{In}_{11}$ [25].

Были получены зависимости удельного электросопротивления ρ сплавов от напряженности магнитного поля $\rho(H)$ при различных температурах (рис. 4). Измерения $\rho(H)$ при каждой температуре проводили после предварительного охла-

ждения образца до 78 К, чтобы начальное структурное состояние было всегда одинаковым. При всех температурах электросопротивление уменьшается с ростом напряженности внешнего магнитного поля, т.е. наблюдается отрицательное магнитосопротивление. По мере приближения температуры к температуре мартенситного превращения изменение электросопротивления с ростом магнитного поля значительно увеличивается и зависимости $\rho(H)$ характеризуются наличием гистерезиса. Данная особенность указывает на то, что в сплавах происходит необратимое индуцированное магнитным полем мартенситное превращение.

Были получены температурные зависимости магнитосопротивления сплавов в магнитном поле 18 кЭ. Измерения магнитосопротивления проводили в мартенситном структурном состоянии (78 К), в аустенитном состоянии (300 К) и при температурах, близких к температуре спонтанного мартенситного превращения в сплавах. Резкий рост магнитосопротивления наблюдается в узкой области температур вблизи температуры T_M , где происходит индуцируемое магнитным полем мартенситное превращение. Максимальная абсолютная величина магнитосопротивления достигает $\sim -29\%$ для сплава $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$, $\sim -27\%$ для $Ni_{49}Mn_{38}Sn_{13}$, $\sim -25\%$ для $Ni_{48}Mn_{39}Sn_{13}$, $\sim -45\%$ для $Ni_{47}Mn_{40}Sn_{13}$. Магнитосопротивление сплавов $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$, $Ni_{49}Mn_{38}Sn_{13}$, $Ni_{48}Mn_{39}Sn_{13}$ оказалось значительно ниже, чем спонтанное изменение электросопротивления при мартенситном превращении, которое составляет ~ -43 , -43 и -46% , соответственно (рис. 3). Низкие значения магнитосопротивления в магнитном поле 18 кЭ обусловлены тем, что напряженности магнитного поля 18 кЭ недостаточно, чтобы весь образец переходил в аустенитное состояние, поскольку индуцируемое магнитным полем мартенситное превращение происходит в широком интервале магнитных полей, достигающем 200 кЭ [25, 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние замещения атомов никеля атомами марганца в трехкомпонентных сплавах $Ni_{51-x}Mn_{36+x}Sn_{13}$ ($0 \leq x \leq 4$) на особенности структуры и магнитотранспортные свойства.

Установлено, что спонтанное мартенситное превращение в сплавах из мартенсита в аустенит сопровождается уменьшением электросопротивления на 43–47%. Наблюдается отрицательное магнитосопротивление во всех исследованных сплавах. Максимальные изменения удельного электросопротивления и магнитосопротивления достигаются вблизи температур мартенситного превращения. Полученные результаты могут быть полезны для практического применения ис-

следуемых сплавов в качестве многофункциональных материалов.

Исследования структуры проводили в ЦКП “Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов” ИФМ УрО РАН. Измерения магнитных свойств, электросопротивления и магнитосопротивления выполнены в секторе импульсных магнитных полей ИФМ УрО РАН.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (темы “Структура”, “Давление”, “Магнит”) и Программы стратегического академического лидерства УрФУ “Приоритет-2030”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бучельников В.Д., Васильев А.Н., Колецов В.В., Таскаев С.В., Ховайло В.В., Шавров В.Г. Магнитные сплавы с памятью формы: фазовые переходы и функциональные свойства // УФН. 2006. Т. 176. С. 900–906.
2. Sutou Y., Imano Y., Koeda N., Omori T., Kainuma R., Ishida K., Oikawa K. Magnetic and martensitic transformations of NiMnX (X = In, Sn, Sb) ferromagnetic shape memory alloys // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 4358–4360.
3. Krenke T., Acet M., Wassermann E.F., Moya X., Manosa L., Planes A. Martensitic transformations and nature of ferromagnetism in the austenitic and martensitic states of Ni–Mn–Sn alloys // II Phys. Rev. B. 2005. V. 72. P. 014412.
4. Krenke T., Duman E., Acet M., Wassermann E.F., Moya X., Mañosa L., Planes A. Inverse magnetocaloric effect in ferromagnetic Ni–Mn–Sn alloys // Nature Mater. 2005. V. 4. P. 450–454.
5. Brown P.J., Gandy A.P., Ishida K., Kainuma R., Kanomata T., Neumann K.U., Oikata K., Ouladdiaf B., Ziebeck K.R.A. The magnetic and structural properties of the magnetic shape memory compound $Ni_2Mn_{1.44}Sn_{0.56}$ // J. Phys.: Condens. Matter. 2006. V. 18. P. 2249–2259.
6. Koyama K., Watanabe K., Kanomata T., Kainuma R., Oikawa K., and Ishida K. Observation of field-induced reverse transformation in ferromagnetic shape memory alloy $Ni_{50}Mn_{36}Sn_{14}$ // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 132505.
7. Khovaylo V., Koledov V., Shavrov V., Ohtsuka M., Miki H., Takagi T., Novosad V. Influence of Co on phase transitions in $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ // Mater. Sci. Eng. A. 2008. V. 481–482. P. 322–325.
8. Han Z.D., Wang D.H., Zhang C.L., Xuan H.C., Gu B.X., Du Y.W. Low-field inverse magnetocaloric effect in $Ni_{50-x}Mn_{39+x}Sn_{11}$ Heusler alloys // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 042507.
9. Santos J.D., Sanchez T., Alvarez P., Sanchez M.L., Sanchez J.L., Llamazares, Hernando B., Escoda Ll., Suñol J.J., Varga R. Microstructure and magnetic properties of $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ Heusler alloy ribbons // Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 07B326.
10. Buchelnikov V.D., Sokolovskiy V.V. Magnetocaloric Effect in Ni–Mn–X (X = Ga, In, Sn, Sb) Heusler Alloys // Phys. Met. Metal. 2011. V. 112. № 7. P. 633–665.

11. Xuan H.C., Xie K.X., Wang D.H., Han Z.D., Zhang C.L., Gu B.X., Du Y.W. Effect of annealing on the martensitic transformation and magnetocaloric effect in $\text{Ni}_{44.1}\text{Mn}_{44.2}\text{Sn}_{11.7}$ ribbons // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. P. 242506.
12. Hernando B., Llamazares J.L.S., Santos J.D., Escoda L.I., Suñol J.J., Varga R., Baldomir D., Serantes D. Thermal and magnetic field-induced martensite-austenite transition in $\text{Ni}_{50.3}\text{Mn}_{35.3}\text{Sn}_{14.4}$ ribbons // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. P. 042504.
13. Coll R., Escoda L., Saurina J., Sánchez-Llamazares J.L., Hernando B., Sunol J.J. Martensitic transformation in Mn–Ni–Sn Heusler alloys // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2010. V. 99. P. 905–909.
14. Zheng H.X., Wu D.Z., Xue S.C., Frenzel J., Eggeler G., Zhai Q.J. Martensitic transformation in rapidly solidified Heusler $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{12}$ ribbons // *Acta Mater.* 2011. V. 59. Is. 14. P. 5692–5699.
15. Zheng H.X., Wang W., Xue S.C., Zhai Q.J., Frenzel J., Luo Z.P. Composition-dependent crystal structure and martensitic transformation in Heusler Ni–Mn–Sn alloys // *Acta Mater.* 2013. V. 61. P. 4648–4656.
16. Wang W., Yu J., Zhai Q., Luo Z., Zheng H. Origin of retarded martensitic transformation in Heusler Ni–Mn–Sn melt-spun ribbons // *Intermetallics.* 2013. V. 42. P. 126–129.
17. Liu F.S., Wang Q.B., Li S.P., Ao W.Q., Li J.Q. The martensitic transition and magnetocaloric properties of $\text{Ni}_{51}\text{Mn}_{49-x}\text{Sn}_x$ // *Phys. B.* 2013. V. 412. P. 74–78.
18. Caballero-Flores R., Gonzalez-Legarreta L., Rosa W.O., Sanchez T., Prida V.M., Escoda L.I., Sunol J.J., Batdalov A.B., Aliev A.M., Koledov V.V., Shavrov V.G., Hernando B. Magnetocaloric effect, magnetostructural and magnetic phase transformations in $\text{Ni}_{50.3}\text{Mn}_{36.5}\text{Sn}_{13.2}$ Heusler alloy ribbons // *J. Alloys Comp.* 2015. V. 629. P. 332–342.
19. Калетина Ю.В., Герасимов Е.Г., Счастливец В.М., Гавико В.С., Терентьев П.Б. Структурные и магнитные превращения в сплавах $\text{Ni}_{51-x}\text{Mn}_{36+x}\text{Sn}_{13}$ // *ФТТ.* 2015. Т. 57. Вып. 2. С. 361–365.
20. Калетина Ю.В., Герасимов Е.Г., Терентьев П.Б., Калетин А.Ю. Мартенситное превращение и магнитотранспортные свойства в сплаве $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{37}\text{Sn}_{13}$ // *ФММ.* 2020. Т. 121. № 9. С. 981–986.
21. Калетина Ю.В., Герасимов Е.Г., Терентьев П.Б., Калетин А.Ю. Мартенситное превращение, магнитотранспортные свойства и магнитокалорический эффект в сплаве $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ // *ФТТ.* 2019. Т. 61. Вып. 4. С. 769–772.
22. Chatterjee S., Majumdar S., Koledov V. Large magnetoresistance in Ni–Mn–In alloy // *AIP Conference Proceedings.* 2012. V. 1447. P. 1161.
23. Dubenko I., Pathak A.K., Stadler S., Ali N., Kovarskii Y., Prudnikov V.N., Perov N.S., Granovsky A.B. Giant Hall effect in Ni–Mn–In Heusler alloys // *Phys. Rev. B.* V. 80. 2009. P. 092408(4).
24. Калетина Ю.В., Герасимов Е.Г., Терентьев П.Б., Калетин А.Ю. Мартенситное превращение, магнитотранспортные свойства и магнитокалорический эффект в сплавах $\text{Ni}_{47-x}\text{Mn}_{42+x}\text{In}_{11}$ ($0 \leq x \leq 2$) // *ФТТ.* 2021. Т. 63. Вып. 4. С. 521–526.
25. Калетина Ю.В., Герасимов Е.Г., Счастливец В.М., Фокина Е.А., Терентьев П.Б. Индуцированные магнитным полем мартенситные превращения в сплавах $\text{Ni}_{47-x}\text{Mn}_{42+x}\text{In}_{11}$ ($0 \leq x \leq 2$) // *ФММ.* 2013. Т. 114. № 10. С. 911–918.
26. Калетина Ю.В., Счастливец В.М., Королев А.В., Фокина Е.А. Фазовые превращения в сплавах на основе Ni–Mn–In под влиянием магнитного поля // *ФММ.* 2012. Т. 113. № 11. С. 1086–1092.