

Калетина Ю.В., Калетин А.Ю., Пилюгин В.П. Интенсивная пластическая деформация нестехиометрического сплава гейслера на основе Ni–Mn–In // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 53–58. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.06

Kaletina Yu.V., Kaletin A.Yu., Pilyugin V.P. Intensive plastic deformation of non-stoichiometric Ni–Mn–In heusler alloy. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 53–58. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.06

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 3, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.06
УДК 669.24'74'871:620.181

Ю.В. Калетина¹, А.Ю. Калетин^{1,2}, В.П. Пилюгин¹

¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

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

**ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО СПЛАВА
ГЕЙСЛЕРА НА ОСНОВЕ NI–MN–IN**

Проведено исследование сплава Гейслера на основе Ni–Mn–In нестехиометрического состава, в котором реализуется магнитный и структурный фазовые переходы в районе комнатной температуры. Исследовано влияние интенсивной пластической деформации при криогенных температурах на микрокристаллическую структуру, характер излома, микротвердость сплава Гейслера Ni₄₇Mn₄₂In₁₁. Отожженный сплав был подвергнут деформации методом кручения под высоким давлением. Пластическую деформацию осуществляли в наковальнях Бриджмена под давлением 8 ГПа при температуре 77 К. Сдвиг под давлением проводили при вращении нижней наковальни со скоростью $\omega = 0,3$ об/мин, угол поворота φ варьировали от 0 до 5 об. Методами оптической и электронной микроскопии была изучена структура сплава после деформации. С помощью сканирующей электронной микроскопии были выявлены особенности поверхности изломов в исходном состоянии и после деформационных воздействий различной интенсивности. Структура отожженного сплава при комнатной температуре поликристаллическая двухфазная, состоящая из высокотемпературной L₂₁-фазы и мартенситных кристаллов, средний размер зерен составляет до 500 мкм, при разрушении этой структуры наблюдается хрупкий излом. Показано, что после деформации кручением под давлением при температуре жидкого азота поликристаллическая структура сплава измельчается до нанокристаллического состояния с размером зерен до ≈ 90 нм во всем объеме образца, при этом разрушение материала приобретает в основном вязкий характер и улучшаются пластические свойства материала. Деформация при криогенной температуре вызывает значительное повышение микротвердости, наблюдается упрочнение сплава практически в два раза по сравнению с исходным отожженным состоянием, при этом подавляется мартенситное превращение.

Ключевые слова: фазовое превращение, сплав Гейслера, мартенсит, деформация, микротвердость, кручение под давлением, структура, излом, степень деформации, нанокристаллическое состояние.

Yu.V. Kaletina¹, A.Yu. Kaletin^{1,2}, V.P. Pilyugin¹

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

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

**INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION
OF NON-STOICHIOMETRIC NI–MN–IN HEUSLER ALLOY**

A study was carried out of a Heusler alloy based on Ni–Mn–In of nonstoichiometric composition, in which magnetic and structural phase transitions occur in the region of room temperature. The effect of severe plastic deformation at low temperatures on the microcrystalline structure, the fracture mode, and the microhardness of the Heusler alloy Ni₄₇Mn₄₂In₁₁ has been investigated. The annealed alloy was subjected to high pressure torsion deformation. Plastic deformation was carried out in Bridgman anvils under a pressure of 8 GPa at a temperature of 77 K. Shear under pressure was performed with the rotation of the lower anvil at a speed of $\omega = 0.3$ rpm, the angle of rotation φ was varied from 0 to 5 rpm. The structure of the alloy after deformation was studied by methods of optical and electron microscopy. With the help of scanning electron microscopy, the features of the fracture surface were revealed in the initial state and after deformation effects of various intensities. The structure of the annealed alloy at room temperature is polycrystalline two-phase, consisting of a high-temperature L₂₁-phase and martensitic crystals, the average grain size is up to 500 μm ; upon destruction of this structure, a brittle fracture is observed. It was shown that after deformation by torsion under pressure at liquid nitrogen temperature, the polycrystalline structure of the alloy is refined to a nanocrystalline state with a grain size of up to ≈ 90 nm in the entire volume of the sample, with the destruction of the material acquiring mainly as viscous and improving the plastic properties of the material. Deformation at cryogenic temperature causes a significant increase in microhardness, the alloy is practically doubled in comparison with the initial annealed state, and the martensitic transformation is suppressed.

Keywords: phase transformation, Heusler alloy, martensite, deformation, microhardness, torsion under pressure, structure, fracture, deformation degree, nanocrystalline state.

Введение

Сплавы Гейслера, особенно нестехиометрического состава, обладающие различными функциональными свойствами [1–21], такими как эффекты памяти формы, магнетокалорический эффект, гигантские магнетодеформации и магнетосопротивления, вызывают неослабевающий интерес исследователей благодаря потенциальным возможностям их практического использования в различных высокотехнологических устройствах [1, 13]. Однако зачастую хрупкость крупнозернистых поликристаллических сплавов Гейслера затрудняет их широкое практическое использование [1]. Получение мелкозернистой структуры является одним из немногих эффективных способов достижения высокопрочного состояния. Измельчить структуру сплавов до субмикроструктурного и нанокристаллического состояний позволяют методы, основанные на воздействии интенсивных пластических деформаций [22–24]. Интенсивная пластическая деформация обычно осуществляется под высоким давлением, при котором возможно достижение значительных степеней деформации без разрушения материала. В наших работах [24, 25] изучено влияние различных видов пластической деформации на микроструктурные особенности и изменение физических и механических свойств сплава Гейслера $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$.

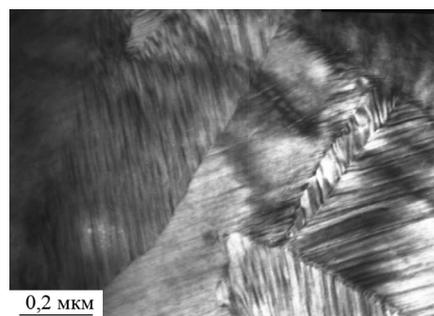
Целью настоящей работы являлось исследование влияния пластической деформации кручением под высоким давлением при криогенной температуре на структуру и свойства сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$.

Материал и методика исследования

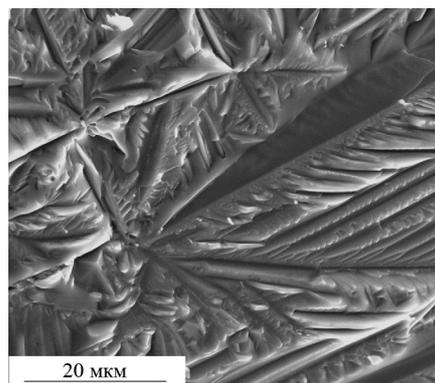
Сплав $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ синтезировали методом электродуговой плавки в атмосфере аргона. После выплавки его подвергали гомогенизирующему отжигу в вакууме при температуре 1123 К в течение 24 ч с последующим охлаждением с печью. Затем осуществляли пластическую деформацию в наковальнях Бриджмена при давлении 8 ГПа и температуре 77 К. Угловая скорость вращения наковален при деформировании составляла 0,3 об/мин, угол поворота φ варьировали от 0 до 5 об. После деформации измеряли микротвердость на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при нагрузке 0,5 Н, проводили электронно-микроскопические исследования изломов и структуры на сканирующем электронном микроскопе Quanta-200 и просвечивающем электронном микроскопе JEM-200СХ.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования, проведенные нами ранее [15, 16, 18], показали, что сплав $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ при высокой температуре находится в однофазном состоянии и имеет кристаллическую структуру, упорядоченную по типу $L2_1$. При охлаждении до температуры 310 К в сплаве наблюдается магнитный переход из парамагнитного в ферромагнитное состояние, затем в ферромагнитном аустените при $T_M \approx 300$ К происходит мартенситное превращение [18]. Электронно-микроскопические исследования структуры (рис. 1, а) и кристаллографический анализ показали, что мартенситная структура модулированная и соответствует параметрам решетки 14М мартенсита [25, 26]. В недеформированных образцах сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ после отжига (исходное состояние) излом хрупкий (рис. 1, б). Среднее значение микротвердости сплава в исходном состоянии составляет 3000 МПа. После осадки, когда угол поворота наковальни $\varphi = 0^\circ$, поверхность разрушения также носит хрупкий характер. Разрушение явно проходит по границам мартенситных рек. После осадки значение микротвердости увеличилось до 4100 МПа.



а



б

Рис. 1. Микроструктура (а) и поверхность излома (б) сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ после отжига

После деформации кручением под высоким давлением (КВД) с увеличением степени деформации вид излома существенно изменяется. Если в случае поворота наковальни на угол $\varphi = 5^\circ$ разрушение материала идет в основном либо поперек мартенситных кристаллов, образуя слоистую структуру, либо по стыкам мартенситных пакетов, то с ростом степени деформации излом изменяется от хрупкого к вязкоподобному (рис. 2). Отсутствует разрушение по границам самих кристаллов мартенсита, слоистость постепенно заменяется вязким разрушением. После деформации кручением на $n = 5$ об. структура становится близкой к аморфно-нанокристаллическому состоянию со средним размером зерен до ≈ 90 нм и менее (см. рис. 2, з). Пластическая деформация методом кручения под давлением приводит к формированию ячеистой структуры. С увеличением степени деформации ячеистая структура занимает все больший объем образца, разориентировка ячеек увеличивается, а размер ячеек

уменьшается от сотен до десятков нанометров. При образовании такой структуры уменьшается упругая энергия системы. Границы зерен находятся в неравновесном состоянии. Вокруг границ существуют области сильных искажений кристаллической решетки, вызванные зернограничными дислокациями, которые обеспечивают относительное смещение зерен.

На рис. 3 показано, как изменяется величина микротвердости сплава после деформации при криогенной температуре на разную степень. После осадки наблюдается прирост микротвердости с 3000 до 4100 МПа. С ростом числа оборотов деформация кручением под давлением приводит к росту микротвердости приблизительно на такую же величину, как при осадке, – на 1000 МПа. Максимальная микротвердость составила 5100 МПа после КВД от 1 до 5 об. После деформации на 1 об. микротвердость выходит на насыщение, что связано, по-видимому, с формированием деформационной нанокристаллической структуры.

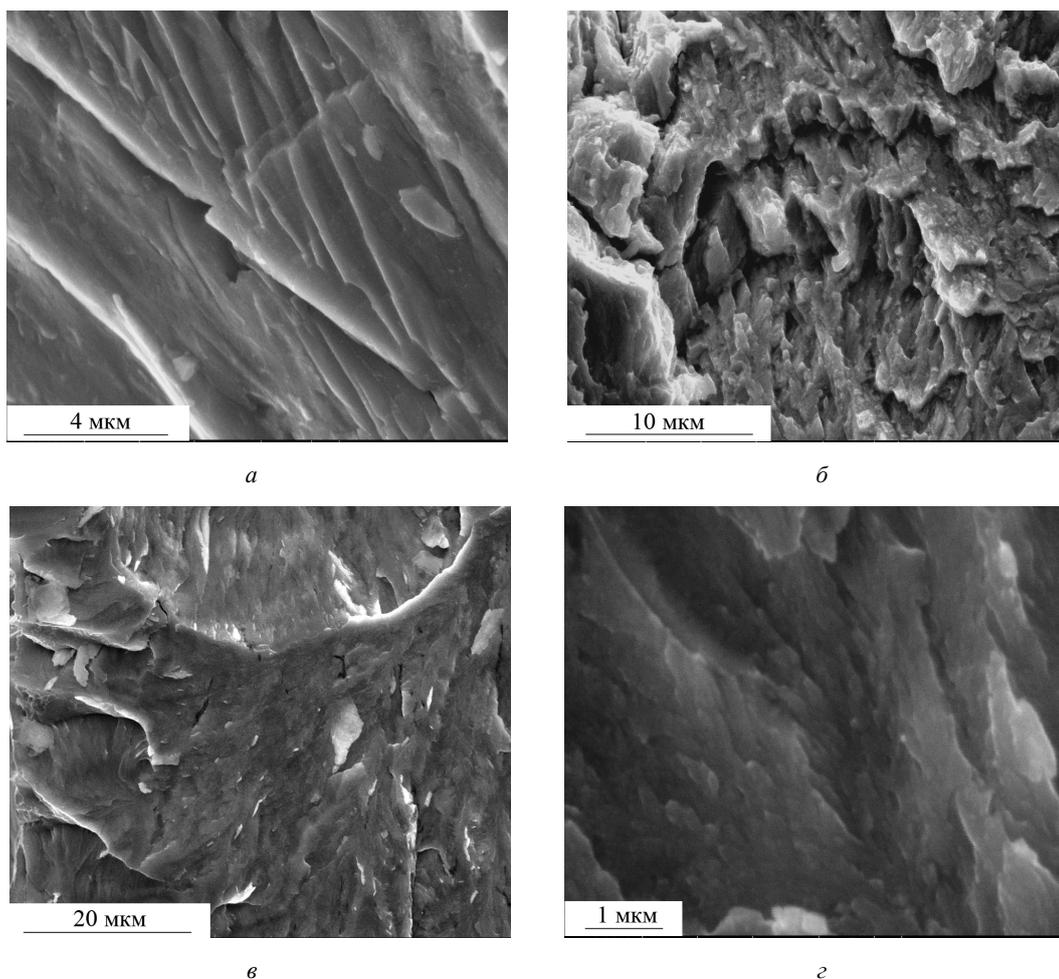


Рис. 2. Поверхность излома образцов сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ после отжига и деформации кручением под давлением 8 ГПа при температуре 77 К, угол поворота: а – $\varphi = 15^\circ$; б – $n = 1$ об.; в – $n = 2,5$ об.; з – $n = 5$ об.

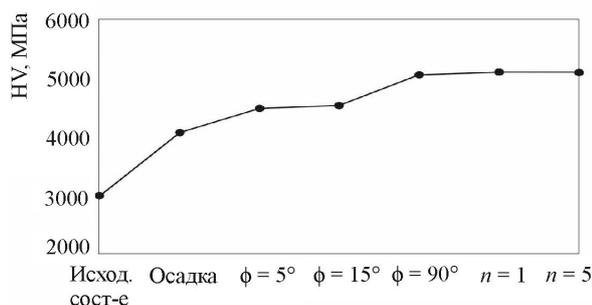


Рис. 3. Зависимость микротвердости сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ от степени деформации при $T = 77 \text{ K}$

Электронно-микроскопические исследования структуры сплава после деформации показали, что после сдвига под давлением на угол 90° наблюдается микрокристаллическая структура. Увеличение степени деформации до $n = 2,5 \dots 5$ об. приводит к существенному измельчению структуры (рис. 4).

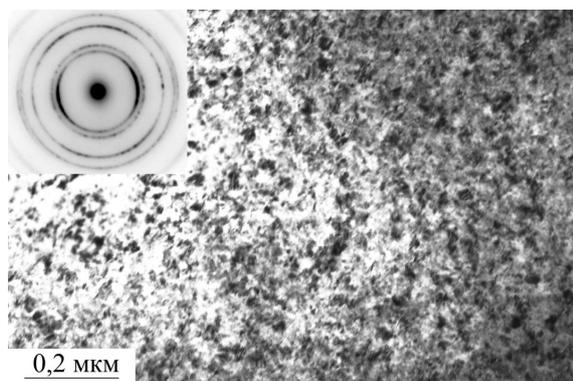


Рис. 4. Структура сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ после деформации кручением под давлением 8 ГПа на $n = 2,5$ об.

После деформации мартенсит в структуре не наблюдается, она становится однородной и имеет равномерное нанокристаллическое строение.

Заключение

Проведенное исследование изменения структуры и свойств сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ после пластической деформации методом кручения под давлением 8 ГПа при температуре жидкого азота показало, что с увеличением числа оборотов наковальни до $n = 5$ можно получить нанокристаллическое состояние, при этом разрушение материала приобретает вязкий характер. С ростом степени деформации доля вязкой составляющей в изломе возрастает, наблюдается рост микротвердости сплава. После пластической деформации кручением под высоким давлением при криогенной температуре, наряду с измельчением структуры, подавляется мартенситное превращение.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (темы «Структура» з.р. № АААА-А18-118020190116-6, «Давление» з.р. № АААА-А18-118020190104-3) при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-03-00056).

Список литературы

1. Ферромагнетики с памятью формы / А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, Т. Тагаки, В.В. Ховайло, Э.И. Эстрин // УФН. – 2003. – Т. 173. – С. 577–608.
2. Магнитные сплавы с памятью формы: фазовые переходы и функциональные свойства / В.Д. Бучельников, А.Н. Васильев, В.В. Коледов, В.В. Ховайло, С.В. Таскаев, В.Г. Шавров // УФН. – 2006. – Т. 176, № 8 – С. 900–906.
3. Счастливцев В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А. Мартенситное превращение в магнитном поле. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2007. – 322 с.
4. Ferromagnetism in the austenitic and martensitic states of Ni–Mn–In alloys / T. Krenke, M. Acet, E. Wassermann, X. Moya, L. Manosa, A. Planes // Phys. Rev. B. – 2006. – Vol. 73, iss. 17. – P. 174413.
5. Large magnetoresistance in single crystalline $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{In}_x$ alloys ($x = 14 \dots 16$) upon martensitic transformation / S.Y. Yu, Z.H. Liu, G.D. Liu, J.L. Chen, Z.X. Cao, G.H. Wu, B. Zhang, X.X. Zhang // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 89, iss. 16. – P. 162503.
6. Magnetic field induced shape recovery by reverse phase transformation / R. Kainuma, Y. Imano, W. Ito, Y. Sutou, H. Morito, S. Okamoto, O. Kitakami, K. Oikawa, A. Fujita, T. Kanomata, K. Ishida // Nature. – 2006. – Vol. 439. – P. 957–960.
7. Large magnetic entropy changes in the $\text{Ni}_{45,4}\text{Mn}_{41,5}\text{In}_{13,1}$ Ferromagnetic Shape Memory Alloy / Z.D. Han, D.H. Wang, C.L. Zhang, S.L. Tang, B.X. Gu, Y.W. Du // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 89, iss. 18. – P. 182507.
8. Martensitic and magnetic transformation behaviors in heusler type NiMnIn and NiCoMnIn metamagnetic shape memory alloys / W. Ito, Y. Imano, R. Kainuma, Y. Sutou, K. Oikawa // Metal. Mater. Trans. A. – 2007. – Vol. 38. – P. 759–766.
9. Magnetic superelasticity and inverse magnetocaloric effect in Ni–Mn–In / T. Krenke, E. Duman, M. Acet, E.F. Wassermann, X. Moya, L. Manosa, A. Planes, E. Suard, B. Ouladdiaf // Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys. – 2007. – Vol. 75, iss. 10. – P. 104414.
10. Inverse magnetocaloric effect in ferromagnetic $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{37+x}\text{In}_{13-x}$ heusler alloys / M. Khan, A. Naushad, and S. Stadler // J. Appl. Phys. – 2007. – Vol. 101, iss. 5. – P. 053919.
11. Low field inverse magnetocaloric effect in $\text{Ni}_{50-x}\text{Mn}_{39+x}\text{In}_{11}$ heusler alloys / Z.D. Han, D.H. Wang, C.L. Zhang, H.C. Xuan, B.X. Gu, Y.W. Du // Appl. Phys. Lett. – 2007. – Vol. 90, iss. 4. – P. 042507.
12. Martensitic transformation and the magnetocaloric effect in $\text{Ni}_{50-x}\text{Mn}_{38-x}\text{In}_{12}$ alloys / Z.D. Han, D.H. Wang, C.L. Zhang, H.C. Xuan, J.R. Zhang, B.X. Gu, Y.W. Du // The solid state commun. – 2008. – Vol. 146. – P. 124–127.
13. Actuators based on composite material with shape-memory effect / A.V. Irzhak, D.I. Zakharov, V.S. Kalashni-

kov, V.V. Koledov, D.S. Kuchin, G.A. Lebedev, P.V. Lega, E.P. Perov, N.A. Pikhtin, V.G. Pushin, I.S. Tarasov, V.V. Khovailo, V.G. Shavrov, A.V. Shelyakov // *J. of Comm. Tech. and Electr.* – 2010. – Vol. 55, iss. 7. – P. 818–830.

14. Buchelnikov V.D., Sokolovskiy V.V. Magneto-caloric effect in Ni–Mn–X (X = Ga, In, Sn, Sb) Heusler alloys // *The Physics of Metals and Metallography.* – 2011. – Vol. 112, no. 7. – P. 633–665.

15. Martensitic and magnetic transformations in Ni–Mn–In alloys / V.M. Schastlivtsev, Yu.V. Kaletina, E.A. Fokina, V.A. Kazantsev // *Phys. Met. Metallogr.* – 2011. – Vol. 112, no. 1. – P. 61–71.

16. Калетина Ю.В., Счастливцев В.М., Фокина Е.А. Фазовые превращения и свойства сплава Гейслера системы Ni–Mn–In // ПЖТФ. – 2013. – Т. 39, вып. 11. – С. 71–79.

17. Magnetocaloric effect (MCE) in melt-extracted Ni–Mn–Ga–Fe Heusler microwires / Y. Liu, X. Zhang, D. Xing, H. Shen, D. Chen, J. Liu, J. Sun // *J. of All. and Comp.* – 2014. – Vol. 616. – P. 184–188.

18. Индуцированные магнитным полем мартенситные превращения в сплавах $Ni_{47-x}Mn_{42+x}In_{11}$ ($0 \leq x \leq 2$) / Ю.В. Калетина, Е.Г. Герасимов, В.М. Счастливцев, Е.А. Фокина, П.Б. Терентьев // ФММ. – 2013. – Т. 114, вып. 10. – С. 911–918.

19. Giant magnetocaloric effect in a Heusler $Mn_{50}Ni_{40}In_{10}$ unidirectional crystal / J. Ren, H. Li, S. Feng, Q. Zhai, J. Fu, Z. Luo, H. Zheng // *Intermetallics.* – 2015. – Vol. 65. – P. 10–14.

20. Прямой и обратный магнитокалорический эффект в сплавах Гейслера $Ni_{1,81}Mn_{1,64}In_{0,55}$, $Ni_{1,73}Mn_{1,80}In_{0,47}$, and $Ni_{1,72}Mn_{1,51}In_{0,49}Co_{0,28}$ / Р.Р. Файзуллин, А.В. Маширов, В.Д. Бучельников, В.В. Коледов, В.Г. Шавров, С.В. Таскаев, М.В. Жуков // *Радиотехника и электроника.* – 2016. – Т. 61, вып. 10. – С. 994–1003.

21. The effects of substituting Ag for In on the magnetoresistance and magnetocaloric properties of Ni–Mn–In Heusler alloys / S. Pandey, A. Quetz, A. Aryal, T. Samanta, I. Dubenko, S. Stadler, N. Ali. // *AIP Adv.* – 2016. – Vol. 6. – P. 056213.

22. Влияние интенсивной пластической деформации на структуру и свойства сплава $Ni_{2,16}Mn_{0,84}Ga$ / Н.И. Коуров, В.Г. Пушин, А.В. Королев, В.А. Казанцев, Е.Б. Марченкова, А.Н. Уксусников // ФММ. – 2007. – Т. 103. – С. 280–287.

23. Мелкозернистая структура и свойства сплава системы Ni_2MnIn после пластической деформации осадкой / И.И. Мусабилов, И.М. Сафаров, М.И. Нагимов, И.З. Шарипов, В.В. Коледов, А.В. Маширов, А.И. Рудской, Р.Р. Мулюков // ФТТ. – 2016. – Т. 58, вып. 8. – С. 1552–1557.

24. Калетина Ю.В., Грешнова Е.Д., Калетин А.Ю. Эволюция структуры и свойств сплава $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ после пластической деформации // ФТТ. – 2019. – Т. 61, вып. 11. – С. 2204–2209.

25. Фазовые превращения и структура сплавов Ni–Mn–In при изменении соотношения Ni/Mn / Ю.В. Калетина, Н.Ю. Фролова, В.М. Гундырев, А.Ю. Калетин // ФТТ. – 2016. – Т. 58, вып. 8. – С. 1606–1614.

26. Кристаллографические особенности структуры мартенсита сплава $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ / Ю.В. Калетина,

И.Г. Кабанова, Н.Ю. Фролова, В.М. Гундырев, А.Ю. Калетин // ФТТ. – 2017. – Т. 59, вып. 10. – С. 1984–1991.

References

1. Vasil'ev A.N., Buchelnikov V.D., Takagi T., Khovailo V.V., Estrin E.I. Ferromagnetiki s pamyat'yu formy [Shape memory ferromagnets]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2006, vol. 176, no. 8, pp. 900–906.

2. Buchelnikov V.D., Vasil'ev A.N., Koledov V.V., Hovailo V.V., Taskaev S.V. Magnitnie splavi s pamayt'u formi: fasovie perehodi i funktsional'nie svoystva [Magnetic alloys with shape memory: phase transitions and functional properties]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2003, vol. 173, no. 6, pp. 577–608.

3. Schastlivtsev V.M., Kaletina Iu.V., Fokina E.A. Martensitnoe prevrashchenie v magnitnom pole [Martensitic transformation in a magnetic field]. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 2007. 322 p.

4. T. Krenke, M. Acet, E. Wassermann, X. Moya, L. Manosa, A. Planes. Ferromagnetism in the austenitic and martensitic states of Ni-Mn-In. *Phys. Rev. B.*, 2006, vol. 73, iss. 17, p. 174413.

5. S.Y. Yu, Z.H. Liu, G.D. Liu, J.L. Chen, Z.X. Cao, G.H. Wu, B. Zhang, X.X. Zhang. Large Magnetoresistance in Single Crystalline $Ni_{50}Mn_{50-x}In_x$ Alloys ($x=14-16$) upon Martensitic. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, iss. 16, p.162503.

6. R. Kainuma, Y. Imano, W. Ito, Y. Sutou, H. Morito, S. Okamoto, O. Kitakami, K. Oikawa, A. Fujita, T. Kanomata, K. Ishida. Magnetic Field Induced Shape Recovery by Reverse Phase Transformation. *Nature*, 2006, vol. 439, pp. 957–960.

7. Z.D. Han, D.H. Wang, C.L. Zhang, S.L. Tang, B.X. Gu, Y.W. Du. Large Magnetic Entropy Changes in the $Ni_{45.4}Mn_{41.5}In_{13.1}$ Ferromagnetic Shape Memory Alloy. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, iss. 18, p. 182507.

8. W. Ito, Y. Imano, R. Kainuma, Y. Sutou, K. Oikawa. Martensitic and Magnetic Transformation Behaviors in Heusler Type NiMnIn and NiCoMnIn Metamagnetic Shape Memory Alloys. *Metal. Mater. Trans. A.*, 2007, vol. 38, pp. 759–766.

9. T. Krenke, E. Duman, M. Acet, E.F. Wassermann, X. Moya, L. Manosa, A. Planes, E. Suard, B. Ouladdiaf. Magnetic Superelasticity and Inverse Magnetocaloric Effect in Ni–Mn–In. *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.*, 2007, vol. 75, iss. 10, p. 104414.

10. M. Khan, A. Naushad, and S. Stadler. Inverse Magnetocaloric Effect in Ferromagnetic $Ni_{50}Mn_{37+x}In_{13-x}$ Heusler Alloys. *Journal Appl. Phys.*, 2007, vol. 101, iss. 5, p. 053919.

11. Z.D. Han, D.H. Wang, C.L. Zhang, H.C. Xuan, B.X. Gu, Y.W. Du. Low Field Inverse Magnetocaloric Effect in $Ni_{50-x}Mn_{39+x}In_{11}$ Heusler Alloys. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, vol. 90, iss. 4, p. 042507.

12. Z.D. Han, D.H. Wang, C.L. Zhang, H.C. Xuan, J.R. Zhang, B.X. Gu, Y.W. Du. Martensitic Transformation and the Magnetocaloric Effect in $Ni_{50-x}Mn_{38-x}In_{12}$ Alloys. *The Solid State Commun.*, 2008, vol. 146, pp. 124–127.

13. Irzhak A.V., Zakharov D.I., Kalashnikov V.S., Koledov V.V., Kuchin D. S., Lebedev G.A., Lega P.V.,

Perov E.P., Pikhtin N.A., Pushin V.G., Tarasov I.S., Khovailo V.V., Shavrov V.G., Shelyakov A.V. Actuators based on composite material with shape-memory effect. *Journal of Comm. Tech. and Electr.*, 2010, vol. 55, iss. 7, pp. 818–830.

14. Buchelnikov V.D., Sokolovskiy V.V. Magneto-caloric effect in Ni-Mn-X (X = Ga, In, Sn, Sb) Heusler alloys. *The Physics of Metals and Metallography*, 2011, vol. 112, no. 7, pp. 633–665.

15. Schastlivtsev V.M., Kaletina Yu.V., Fokina E.A., Kazantsev V.A. Martensitnye i magnitnye prevrasheniia v splavakh Ni-Mn-In. [Martensitic and Magnetic Transformations in Ni–Mn–In Alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2011, vol. 112, no. 1, pp. 61–71.

16. Kaletina Yu.V., Schastlivtsev V.M., Fokina E.A. Fazovyye prevrashcheniya i svoystva splava Geyslera sistemy Ni-Mn-In [Phase Transformations and Properties of the Ni–Mn–In Heusler Alloy]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2013, vol. 39, iss. 11, pp. 71–79.

17. Y. Liu, X. Zhang, D. Xing, H. Shen, D. Chen, J. Liu, J. Sun. Magnetocaloric effect (MCE) in melt-extracted Ni–Mn–Ga–Fe Heusler microwires. *Journal of All. and Comp.*, 2014, vol. 616, pp. 184–188.

18. Kaletina Yu.V., Gerasimov E.G., Schastlivtsev V.M., Fokina E.A., Terent'ev P.B. Martensitnyye prevrashcheniya, indutsirovannyye magnitnym polem v splavakh $Ni_{47-x}Mn_{42+x}In_{11}$ (pri $0 \leq x \leq 2$). [Magnetic Field Induced Martensitic Transformations in $Ni_{47-x}Mn_{42+x}In_{11}$ Alloys (with $0 \leq x \leq 2$)]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2013, vol. 114, iss. 10, pp. 911–918.

19. J. Ren, H. Li, S. Feng, Q. Zhai, J. Fu, Z. Luo, H. Zheng. Giant magnetocaloric effect in a Heusler $Mn_{50}Ni_{40}In_{10}$ unidirectional crystal. *Intermetallics*, 2015, Vol. 65, P. 10–14.

20. Fayzullin R.R., Buchelnikov V.D., Taskaev S.V., Mashirov A.V., Koledov V.V., Shavrov V.G., Zhukov M.V. *Pryamoy i obratnyy magnitokaloricheskiy effekt v splavakh Geyslera $Ni_{1.81}Mn_{1.64}In_{0.55}$, $Ni_{1.73}Mn_{1.80}In_{0.47}$, and $Ni_{1.72}Mn_{1.51}In_{0.49}Co_{0.28}$* [Direct and Inverse Magnetocaloric Effect in $Ni_{1.81}Mn_{1.64}In_{0.55}$, $Ni_{1.73}Mn_{1.80}In_{0.47}$, and $Ni_{1.72}Mn_{1.51}In_{0.49}Co_{0.28}$ Heusler Alloys], *Radiotekhnika i elektronika*, 2016, vol. 61, iss. 10, pp. 994–1003.

21. S. Pandey, A. Quetz, A. Aryal, T. Samanta, I. Dubenko, S. Stadler, N. Ali. The effects of substituting Ag for In on the magnetoresistance and magnetocaloric properties of Ni-Mn-In Heusler alloys. *AIP Adv.*, 2016, vol. 6, p. 056213.

22. Kourov N.I., Pushin V.G., Korolev A.V., Kazantsev V.A., Marchenkova E.B., Uksusnikov A.N. Vliianiie intensivnoi plasticheskoi deformatsii na strukturu i svoystva splava $Ni_{2.16}Mn_{0.84}Ga$ [Effect of severe plastic deformation on the structure and properties of the $Ni_{2.16}Mn_{0.84}Ga$ alloy]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2007, vol. 103, no. 3, pp. 270–277.

23. Musabirov I.I., Safarov I.M., Nagimov M.I., Sharipov I.Z., Koledov V.V., Mashirov A.V., Rudskoi A.I., Muliukov R.R. Melkozernistaia struktura i svoystva splava sistemy Ni_2MnIn posle plasticheskoi deformatsii osadkoi

[Fine-grained structure and properties of alloy of the Ni_2MnIn system after plastic deformation by draft]. *Fizika Tverdogo Tela*, 2016, vol. 58, iss. 8, pp. 1552–1557.

24. Kaletina Yu.V., Greshnova E.D., Kaletin A.Yu. Evoliutsiia struktury i svoistv splava $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ posle plasticheskoi deformatsii [Evolution of the structure and properties of the $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ alloy after plastic deformation]. *Fizika Tverdogo Tela*, 2019, vol. 61, iss. 11, pp. 2204–2209.

25. Kaletina Yu.V., Frolova N.Yu., Gundyrev V.M., Kaletin A.Yu. Fazovye prevrashcheniya i struktura splavov Ni-Mn-In pri izmenenii sootnosheniia Ni/Mn [Phase transformations and structure of Ni-Mn-In alloys with a change in the Ni / Mn ratio]. *Fizika Tverdogo Tela*, 2016, vol. 58, iss. 8, pp. 1606–1614.

26. Kaletina Yu.V., Kabanova I.G., Frolova N.Yu., Gundyrev V.M., Kaletin A.Yu. Kristallograficheskie osobennosti struktury martensita splava $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ [Crystallographic features of the structure of martensite of the $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ alloy]. *Fizika Tverdogo Tela*, 2017, vol. 59, iss. 10, pp. 1984–1991.

Получено 27.07.2021

Опубликовано 30.09.2021

Сведения об авторах

Калетина Юлия Владимировна (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, e-mail: kaletina@imp.uran.ru.

Калетин Андрей Юрьевич (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, старший научный сотрудник Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, e-mail: akalet@imp.uran.ru.

Пилюгин Виталий Прокофьевич (Екатеринбург, Россия) – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, e-mail: pilyugin@imp.uran.ru.

About the authors

Yulia V. Kaletina (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Chief Research Scientist, Institute of Metal Physics named after M.N. Miheev of Ural Branch of RAS, e-mail: kaletina@imp.uran.ru.

Andrey Yu. Kaletin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Research Scientist, Institute of Metal Physics named after M.N. Miheev of Ural Branch of RAS; Senior Research Scientist, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin, e-mail: akalet@imp.uran.ru.

Vitaliy P. Pilyugin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher Scientist, Institute of Metal Physics named after M.N. Miheev of Ural Branch of RAS, e-mail: pilyugin@imp.uran.ru.