

Калетина Ю.В., Грешнова Е.Д., Калетин А.Ю., Пилугин В.П. Влияние деформации на структуру и свойства сплава гейслера Ni₄₇Mn₄₂In₁₁ // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 5–11. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.01.

Kaletina Yu.V., Greshnova E.D., Kaletin A.Yu., Pilyugin V.P., Miheev M.N. Influence of the deformation on structure and properties of heusler alloy Ni₄₇Mn₄₂In₁₁. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 5-11. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.01.

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 20, № 2, 2018
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.01

УДК 669.24'74'871:620.181

Ю.В. Калетина, Е.Д. Грешнова, А.Ю. Калетин, В.П. Пилугин

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА ГЕЙСЛЕРА Ni₄₇Mn₄₂In₁₁

Исследовано влияние различных видов и условий деформации на структуру, характер излома и свойства тройного сплава Гейслера Ni₄₇Mn₄₂In₁₁. Отожженный сплав был подвергнут деформации прокаткой при комнатной температуре и деформации осадкой при значениях температуры 77, 300 и 873 К. Степень деформации варьировали от 4 до 90 %. Методами оптической металлографии была изучена структура сплава в отожженном состоянии и после деформации. С помощью сканирующей электронной микроскопии были выявлены особенности поверхности изломов. После отжига сплав находится в поликристаллическом состоянии со средним размером зерен ≈200–500 мкм. Структура отожженного сплава при комнатной температуре двухфазная, состоящая из высокотемпературной L₂-фазы и мартенситных кристаллов. На поверхности хрупкого излома выявляются пакеты мартенсита, расположенные друг относительно друга под некоторым углом, внутри которых содержатся преимущественно параллельные мартенситные кристаллы. После всех видов деформации на поверхности изломов видны следы хрупкого разрушения материала с деформированными или разрушенными кристаллами мартенсита. После прокатки и осадки со степенями деформации до 10 % на поверхности излома присутствуют макротрещины, проходящие через мартенситные пакеты. После осадки при T = 300 К со степенью деформации до 90 % были обнаружены микротрещины внутри отдельных кристаллов мартенсита. После осадки при T = 873 К на поверхности излома трещины отсутствовали, однако наблюдалась деформированная структура мартенсита. Деформация прокаткой привела к измельчению зерна изучаемого сплава до 60 мкм. После деформации разными способами микротвердость повышается, достигая максимальных значений после деформации прокаткой. В результате деформации прокаткой среднее значение микротвердости увеличилось более чем в 1,5 раза.

Ключевые слова: ферромагнитные сплавы, мартенсит, структура, деформация осадкой, деформация прокаткой, микротвердость, излом, границы зерен, фазовое превращение, степень деформации.

Yu.V. Kaletina, E.D. Greshnova, A.Yu. Kaletin, V.P. Pilyugin

M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russian Federation

**INFLUENCE OF THE DEFORMATION ON STRUCTURE
AND PROPERTIES OF HEUSLER ALLOY Ni₄₇Mn₄₂In₁₁**

The influence of different types and conditions of deformation on the structure, the character of the fracture and the properties of the triple Heusler alloy Ni₄₇Mn₄₂In₁₁ was studied. The annealed alloy was deformed by rolling at room temperature and upset at temperatures of 77, 300 and 873 K. Strain was varied from 4 to 90%. The structure of the alloy in the annealed condition and after deformation was studied by optical metallography method. The features of the fracture surfaces were revealed with the help of scanning electron microscopy. After annealing the alloy was in polycrystalline condition with an average grain size of ≈200-500 μm. The structure of the annealed alloy at room temperature is two-phase consisting of a high-temperature L₂-phase and martensite crystals. On the brittle fracture surfaces martensite packets are detected located at some angle relative to each other. Martensite packets contain predominantly parallel martensitic crystals. After all types of deformation traces of brittle fracture of material with deformed or destroyed martensite crystals are seen on the fracture surfaces. After rolling and upsetting with strain of up to 10 % there are macrocracks passing through the martensite packets on the fracture surfaces. After the upsetting at T = 300 K with the strain up to 90 % microcracks were found within crystals of martensite. After the upsetting at T = 873 K there were not cracks on the fracture surface but a deformed martensite structure was observed. The deformation by rolling resulted in the grain size refinement of the investigated alloy up to 60 μm. After deformation by different methods the microhardness was increased reaching its maximum values after deformation by rolling. As a result of deformation by rolling the average value of the microhardness was increased more than 1,5 times.

Keywords: ferromagnetic alloys, martensite, structure, deformation by upsetting, deformation by rolling, microhardness, fracture, grain boundaries, phase transformation, strain.

Введение

Технология получения ферромагнитных сплавов, последующая их обработка, внешние воздействия оказывают существенное влияние на структуру и физико-механические свойства. Сплавы Гейслера системы Ni–Mn–In относятся к материалам, проявляющим функциональные свойства, такие как ферромагнитный эффект памяти формы [1–4], магнетокалорический эффект [2, 5–7] и др. Ввиду этого эти сплавы представляют интерес для практического применения в современной технике и микроэлектронике [8]. Сплавы на основе системы Ni–Mn–In можно выделить в отдельную группу благодаря определенной последовательности структурно-фазовых превращений [3, 9, 10]. Изменение соотношения Ni/Mn в системе Ni–Mn–In оказывает существенное влияние на температурные интервалы фазовых переходов, структуру и свойства сплавов [3, 10, 11]. В последние годы большое внимание уделяется исследованию сплавов Гейслера нестехиометрических составов на основе Ni–Mn–In, в которых реализуются управляемые магнитным полем эффекты памяти формы [6, 10, 11].

Структуру и свойства трехкомпонентных сплавов $Ni_{47-x}Mn_{42+x}In_{11}$ (где x от 0 до 2) после термоциклической обработки изучали в работах [12, 13]. Было показано, что после многократных циклов нагрева в однофазную область существования парамагнитной $L2_1$ -фазы и охлаждения до температуры жидкого азота изменяется форма границ зерен, повышается микротвердость при сохранении магнитной восприимчивости на прежнем уровне.

Представляет интерес исследование влияния деформационных воздействий на структуру сплавов на основе Ni–Mn–In. В литературе встречаются лишь единичные работы, касающиеся воздействия пластической деформации на структуру сплавов Гейслера. Так, в работе [14] установлено, что пластическая деформация осадкой при значениях температуры 873 и 973 К поликристаллического сплава Гейслера системы Ni_2MnIn приводит к фрагментации зеренной структуры.

Целью настоящей работы являлось исследование структуры и свойств синтезированного тройного сплава $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ после пластической деформации.

Материал и методика исследования

Сплав $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ был выплавлен методом электродуговой плавки в атмосфере аргона. После гомогенизирующего отжига при температуре 1123 К в течение 24 ч с последующим охлаждением с печью из слитка были вырезаны образцы. Для про-

катки – в форме брусков квадратного сечения 5×5 мм, для осадки – кубические образцы размером 5×5×5 мм, а также образцы в виде пластинок размером 0,4×5×5 мм.

Отожженные образцы деформировали разными способами: прокаткой при комнатной температуре ($T = 300$ К), осадкой при комнатной температуре, при температуре жидкого азота ($T = 77$ К) и при нагреве до $T = 873$ К.

После деформации изучали микроструктуру и измеряли микротвердость. Структурные исследования выполнены на шлифах на оптическом микроскопе Neophot-30. Изломы образцов изучали на сканирующем электронном микроскопе Quanta-200 с локальным микрорентгеноспектральным анализом в отделе электронной микроскопии ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов ИФМ УрО РАН». Измерения микротвердости проводили на шлифах после травления на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при нагрузке 0,5 Н и определяли значение твердости как среднее арифметическое из 20–40 параллельных измерений, выполненных при условии сохранения геометрии отпечатка.

Результаты и их обсуждение

Выполненные нами ранее исследования показали, что при высоких значениях температуры сплав $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ находится в аустенитном состоянии и имеет кубическую решетку $L2_1$. При дальнейшем охлаждении до температуры 310 К в аустенитной фазе наблюдается магнитный переход из парамагнитного в ферромагнитное состояние [11]. При охлаждении до $T \approx 300$ К происходит мартенситное превращение. Ввиду этого при комнатной температуре микроструктура исследуемого сплава двухфазная и состоит из $L2_1$ -фазы и кристаллов мартенсита (рис. 1, а). После отжига сплав находится в поликристаллическом состоянии и имеет крупнозернистую структуру с размером зерен ≈ 200 –500 мкм.

На рис. 1, б, в показана поверхность излома образцов сплава после отжига. Излом хрупкий. В нем хорошо видны области скола. Мартенситные кристаллы выходят на поверхность излома, что отчетливо видно на рис. 1, в. Мартенситные кристаллы образуют своеобразные пакеты, в которых кристаллы располагаются чаще всего параллельно друг другу. Мартенситные пакеты разориентированы друг относительно друга на углы от 60° до 120° (см. рис. 1, а, в).

После деформации прокаткой в несколько проходов со степенью 9,8 % зерно измельчилось. Структура и изломы исследованного сплава после деформации прокаткой продемонстрированы на рис. 2.

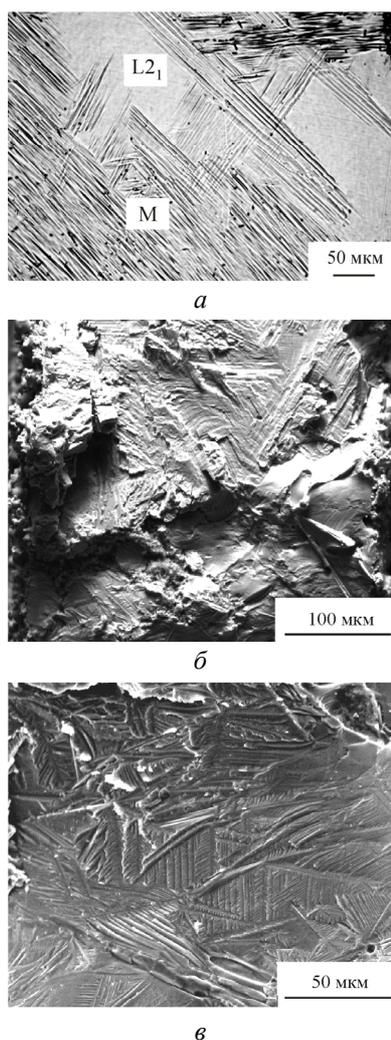


Рис. 1. Микроструктура (а) и поверхность излома (б, в) сплава $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ после отжига при 1123 К и последующего охлаждения с печи. Изображение б получено в режиме обратно отраженных электронов

В микроструктуре сплава присутствуют равноосные зерна со средним размером 60 мкм (см. рис. 2, а). На поверхности хрупкого излома (см. рис. 2, б) видны элементы микроструктуры – разнонаправленные пакеты мартенсита. Кроме этого, наблюдаются отдельные более крупные мартенситные пластины. Обнаружены трещины, которые проходят через кристаллы мартенсита, разрушая мартенситные пакеты. Микрорентгеноспектральный анализ показал отсутствие выделения частиц вторых фаз.

Представляло интерес исследовать структуру образцов, деформированных осадкой. Осадку осуществляли при значениях температуры 77, 300 и 873 К. Степень деформации после осадки образца кубической формы при комнатной температуре составила 93 %, при этом образец полностью разрушился на отдельные фрагменты. Разрушение происходит хрупко (рис. 3). После деформации осадкой при комнатной температуре на поверхности

хрупкого излома видна деформированная мартенситная структура. Внутри различных пакетов встречаются изогнутые кристаллы мартенсита. Помимо крупных трещин, идущих через пакеты мартенсита (см. рис. 3, а), наблюдали микротрещины длиной около 1 мкм, расположенные внутри отдельных мартенситных кристаллов (см. рис. 3, б), чаще всего перпендикулярно длинной оси кристалла мартенсита.

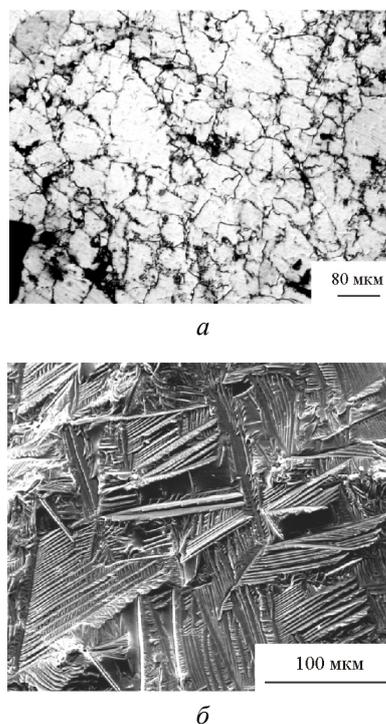


Рис. 2. Сплав $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ после деформации прокаткой при комнатной температуре: а – микроструктура; б – поверхность излома

Образцы в форме пластинок деформировали при комнатной температуре осадкой со степенью 5 %. Степень деформации увеличивается от центра к краю образца. Излом после деформации осадкой при 300 К был исследован от центра до края образца. На рис. 3, в представлен излом центральной части образца. Излом хрупкий, мартенситные пластины раздроблены, при этом нарушена направленность мартенситной структуры.

Излом после осадки при температуре жидкого азота ($T = 77$ К) отличается от излома после осадки при комнатной температуре (сравни рис. 4 и рис. 3, в). Степень деформации при $T = 77$ К достигала 5 %. Наблюдается хрупкое разрушение, мартенситные кристаллы выходят на поверхность излома. В области локализации деформации видно, как изгибаются отдельные кристаллы и пакеты мартенсита в процессе осадки. В изломе присутствует небольшое количество трещин.

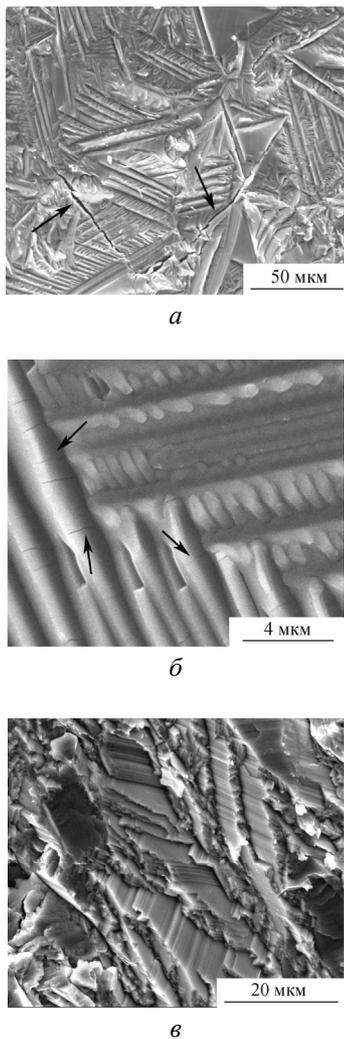


Рис. 3. Поверхность излома сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ после деформации осадкой при температуре 300 К: *а, б* – кубический образец; *в* – центр образца в форме пластины. Стрелками показаны макро- (*а*) и микротрещины (*б*)

Таким образом, можно отметить, что при одинаковой степени деформации ($\approx 5\%$) и различной температуре 300 и 77 К в хрупком изломе в большей степени нарушена и раздроблена мартенситная структура при $T = 300\text{ К}$, в то время как при $T = 77\text{ К}$ мартенситные кристаллы частично разрушены и в целом сохраняют свою ориентацию как в центре, так и на краю образца.

При высокой температуре 873 К образцы были деформированы осадкой со степенью 44 %. После деформации при $T = 873\text{ К}$ в структуре сохраняются крупные зерна размером до 500 мкм. Разрушение происходит хрупко, преимущественно по границам зерен (рис. 5, *а*). На поверхности излома трещины отсутствуют. После разрушения наблюдается слоистый рельеф с деформированными кристаллами мартенсита (рис. 5, *б*).

После деформации различными способами была измерена микротвердость исследуемого

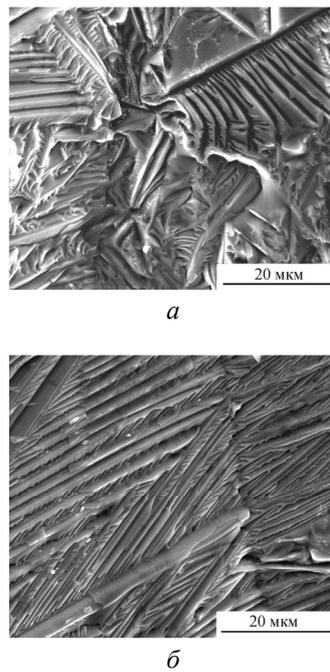


Рис. 4. Поверхность излома образца сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ после осадки при $T = 77\text{ К}$

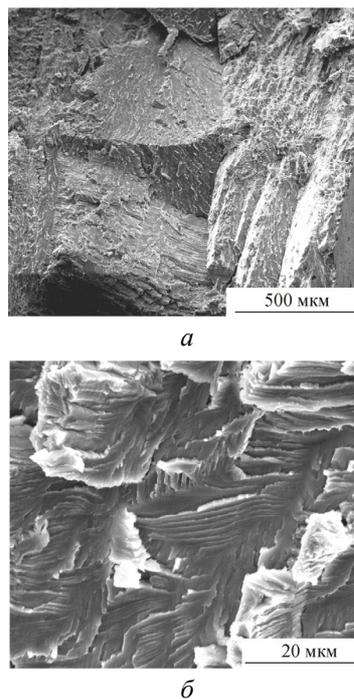


Рис. 5. Поверхность излома образца сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ после осадки при $T = 873\text{ К}$

сплава $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ (рис. 6). В отожженном состоянии среднее значение микротвердости составляет 3000 МПа. После деформации микротвердость возрастает. В результате деформации прокаткой микротвердость сплава увеличилась более чем в 1,5 раза, до среднего значения 5200 МПа. После осадки при всех значениях температуры микротвердость также повысилась. Наибольшее

увеличение микротвердости наблюдается после осадки при $T = 300$ К, среднее значение достигло 4600 МПа.

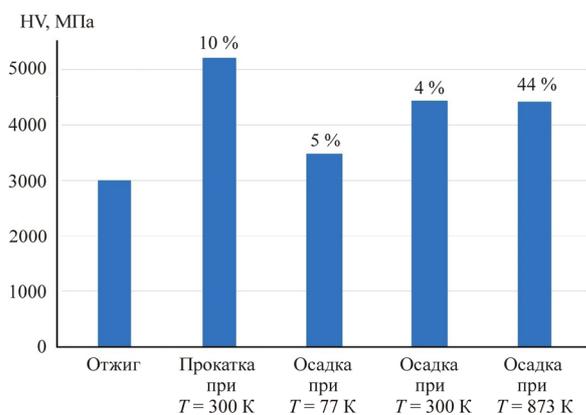


Рис. 6. Микротвердость сплава $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ после различных видов обработки

Результаты исследования структуры и изломов сплава $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ после деформации прокаткой и осадкой показали, что разрушение происходит хрупко. После деформации прокаткой и осадкой в изломе наблюдается большое количество трещин, что связано с малой пластичностью сплава и локализацией деформации при мартенситном превращении. Если после прокатки в основном присутствуют макротрещины, проходящие через мартенситные пакеты, то после деформации осадкой в изломе наблюдается много микротрещин. Макротрещины возникают в разных направлениях, рассекая пакеты мартенситных кристаллов. Микротрещины чаще всего возникают в отдельных мартенситных пластинах, перпендикулярно их длинной оси или под небольшим углом к ней, дробя их на отдельные фрагменты. Возникновение макро- и микротрещин связано с недостаточной релаксацией напряжений при деформации. Поскольку деформация сопровождается развитием мартенситного превращения, которое само по себе представляет деформационный процесс, то уровень напряжений повышается. Упругие напряжения и пластическая деформация оказывают сильное влияние на мартенситное превращение уже на стадии зарождения мартенсита [15]. Исходя из этого температура начала превращения повышается тем сильнее, чем выше напряжения и сильнее деформация.

Известно, что одной из особенностей структуры мартенсита является его высокое сопротивление пластической деформации. Оно обусловлено рядом факторов. Важный вклад вносит размер кристаллов мартенсита. Чем мельче средний размер пакета мартенсита, тем больше упрочнение мате-

риала. Появление субструктуры в результате деформации также способствует упрочнению. Оценка вклада разных элементов субструктуры мартенсита (фрагменты, пакеты, двойники, дефекты упаковки и т.п.) будет предметом дальнейших исследований.

Заключение

Исследовано влияние различных видов деформационного воздействия на структуру, характер излома и микротвердость сплава Гейслера $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$.

Показано, что после всех видов деформации – прокаткой, осадкой при низкой, комнатной и высокой температуре – наблюдается хрупкое разрушение. С увеличением степени деформации количество макротрещин возрастает и появляются микротрещины, что связано с малой релаксацией напряжений.

Деформация приводит к упрочнению сплава, которое зависит от вида и степени деформации. После деформации прокаткой наблюдали максимальное увеличение микротвердости в 1,5 раза по сравнению с отожженным состоянием.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» № АААА-А18-118020190116-6 при частичной поддержке РФФИ (грант № 16-03-00043).

Список литературы

1. 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.
2. Buchelnikov V.D., Sokolovskiy V.V. Magnetocaloric effect in Ni–Mn–X (X = Ga, In, Sn, Sb) Heusler alloys // The Physics of Metals and Metallography. – 2011. – Vol. 112, № 7. – P. 633–665.
3. Калетина Ю.В., Герасимов Е.Г. Мартенситные превращения и магнитные свойства нестехиометрических сплавов системы Ni–Mn–In // ФТТ. – 2014. – Т. 56, вып. 8. – С. 1583–1588.
4. Счастливцев В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А. Мартенситное превращение в магнитном поле. – Екатеринбург: Изд-во Урал. отд-ния Рос. акад. наук, 2007. – 322 с.
5. 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.
6. 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.

7. Magnetic and magnetocaloric properties of martensitic $Ni_2Mn_{1.4}Sn_{0.6}$ Heusler alloy / V.A. Chernenko, J.M. Barandiaran, J.R. Fernandez, D.P. Rojas, J. Gutierrez, P. Lazpita, I. Orue // *JMMM*. – 2012. – Vol. 324, iss. 21. – P. 3519–3525.

8. Actuators based on composite material with shape-memory effect / A.V. Irzhak, D.I. Zakharov, V.S. Kalashnikov, 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.

9. Magnetic and martensitic transformations of $NiMnX$ ($X = In, Sn, Sb$) ferromagnetic shape memory alloys / Y. Sutou, Y. Imano, N. Koeda, T. Omori, R. Kainuma, K. Ishida, K. Oikawa // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – Vol. 85, iss. 9. – P. 4358–4360.

10. Структурные и магнитные превращения в сплавах $Ni_{51-x}Mn_{36+x}Sn_{13}$ / Ю.В. Калетина, Е.Г. Герасимов, В.М. Счастливец, В.С. Гавико, П.Б. Терентьев // *ФТТ*. – 2015. – Т. 57, вып. 2. – С. 361.

11. 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. Счастливец, Е.А. Фокина, П.Б. Терентьев // *ФММ*. – 2013. – Т. 114, вып. 10. – С. 911–918.

12. Влияние термоциклической обработки на структуру и свойства сплавов на основе $Ni-Mn-In$ / Ю.В. Калетина, Е.Д. Ефимова, Е.Г. Герасимов, А.Ю. Калетин // *ЖТФ*. – 2016. – Т. 86, вып. 1. – С. 155–158.

13. Калетина Ю.В., Грешнова Е.Д., Калетин А.Ю. Структура и микротвердость трехкомпонентного сплава $Ni-Mn-In$ после различных режимов термоциклической обработки // *Письма о материалах*. – 2017. – Т. 7, вып. 3. – С. 287–291.

14. 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.

15. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 237 с.

References

1. Buchel'nikov V.D., Vasil'ev A.N., Koledov V.V., Khovailo V.V., Taskaev S.V., Shavrov V.G. Magnitnye splavy s pamiat'iu formy: fazovye perekhody i funktsional'nye svoistva [Magnetic alloys with shape memory: phase transitions and functional properties]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2006, vol. 176, no. 8, pp. 900–906.

2. Buchel'nikov V.D., Sokolovskiy V.V. Magnetocaloric 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.

3. Kaletina Iu.V., Gerasimov E.G. Martensitnye prevrashcheniia i magnitnye svoistva nestekhiometricheskikh splavov sistemy $Ni-Mn-In$ [Martensitny transformations and magnetic properties of not stoichiometric

alloys of the $Ni-Mn-In$ system]. *Fizika Tverdogo Tela*, 2014, vol. 56, iss. 8, pp. 1583–1588.

4. Schastlivtsev V.M., Kaletina Iu.V., Fokina E.A. Martensitnoe prevrashchenie v magnitnom pole [Martensitny transformation in magnetic field]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2007, 322 p.

5. Faizullin R.R., Mashirov A.V., Buchel'nikov V.D., Koledov V.V., Shavrov V.G., Taskaev S.V., Zhukov M.V. Priamo i obratnyi magnitokaloricheskiy effekt v splavakh Geislera $Ni_{1.81}Mn_{1.64}In_{0.55}$, $Ni_{1.73}Mn_{1.80}In_{0.47}$ and $Ni_{1.72}Mn_{1.51}In_{0.49}Co_{0.28}$ [Direct and boomerang magnetocaloric effect in Geyslera alloys $Ni_{1.81}Mn_{1.64}In_{0.55}$, $Ni_{1.73}Mn_{1.80}In_{0.47}$ and $Ni_{1.72}Mn_{1.51}In_{0.49}Co_{0.28}$]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2016, vol. 61, iss. 10, pp. 994–1003.

6. 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.

7. V.A. Chernenko, J.M. Barandiaran, J.R. Fernandez, D.P. Rojas, J. Gutierrez, P. Lazpita, I. Orue. Magnetic and magnetocaloric properties of martensitic $Ni_2Mn_{1.4}Sn_{0.6}$ Heusler alloy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, vol. 324, iss. 21, pp. 3519–3525.

8. 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.

9. Magnetic and martensitic transformations of $NiMnX$ ($X = In, Sn, Sb$) ferromagnetic shape memory alloys. Y. Sutou, Y. Imano, N. Koeda, T. Omori, R. Kainuma, K. Ishida, K. Oikawa. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, vol. 85, iss. 9, pp. 4358–4360.

10. Kaletina Iu.V., Gerasimov E.G., Schastlivtsev V.M., Gaviko V.S., Terent'ev P.B. Strukturnye i magnitnye prevrashcheniia v splavakh $Ni_{51-x}Mn_{36+x}Sn_{13}$ [Structural and magnetic transformations in $Ni_{51-x}Mn_{36+x}Sn_{13}$ alloys]. *Fizika Tverdogo Tela*, 2015, vol. 57, iss. 2, pp. 361.

11. Kaletina Iu.V., Gerasimov E.G., Schastlivtsev V.M., Fokina E.A., Terent'ev P.B. Indutsirovannye magnitnym polem martensitnye prevrashcheniia v splavakh $Ni_{47-x}Mn_{42+x}In_{11}$ ($0 \leq x \leq 2$) [The martensitny transformations induced by magnetic field in alloys $Ni_{47-x}Mn_{42+x}In_{11}$ ($0 \leq x \leq 2$)]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2013, vol. 114, iss. 10, pp. 911–918.

12. Kaletina Iu.V., Efimova E.D., Gerasimov E.G., Kaletin A.Iu. Vliianie termotsiklicheskoj obrabotki na strukturu i svoistva splavov na osno-ve $Ni-Mn-In$ [Influence of thermocyclic processing on structure and property of alloys on the basis of $Ni-Mn-In$]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2016, vol. 86, iss. 1, pp. 155–158.

13. Kaletina Iu.V., Greshnova E.D., Kaletin A.Iu. Struktura i mикротвердost' trekh-komponentnogo splava $Ni-Mn-In$ после razlichnykh rezhimov termotsiklicheskoj obrabotki [Structure and microhardness of three-component $Ni-Mn-In$ alloy after various modes of thermocyclic processing]. *Pis'ma o materialakh*, 2017, vol. 7, iss. 3, pp. 287–291.

14. 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 svoistva splava sistemy $Ni_{2}MnIn$ posle plasticheskoi deformatsii osadkoi [Fine-grained structure and properties of alloy of the $Ni_{2}MnIn$ system after plastic deformation by draft]. *Fizika Tverdogo Tela*, 2016, vol. 58, iss. 8, pp. 1552–1557.

15. Kurdiumov G.V., Utevskaia L.M., Entin R.I. Prevrashcheniia v zheleze i stali [Transformations in iron and steel]. Moscow: Nauka, 1977, 237 p.

Получено 29.03.2018

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.

Грешнова Екатерина Дмитриевна (Екатеринбург, Россия) – младший научный сотрудник Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН; e-mail: efimova@imp.uran.ru.

Калетин Андрей Юрьевич (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН; 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 Researcher Scientist, M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: kaletina@imp.uran.ru.

Ekaterina D. Greshnova (Ekaterinburg, Russian Federation) – Junior Researcher Scientist, M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: efimova@imp.uran.ru.

Andrey Yu. Kaletin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher Scientist, M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: akalet@imp.uran.ru.

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