

Научные тезисы

УДК 669.24'74'871:620.181

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВА
СПЛАВОВ Ni–Mn–In ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИИ
КРУЧЕНИЕМ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

**Юлия Владимировна Калетина^{*}, Андрей Юрьевич Калетин,
Виталий Прокофьевич Пилюгин**

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

** kaletina@imp.uran.ru*

Аннотация. Исследованы сплавы Гейслера системы Ni–Mn–In после деформации методом кручения под давлением 8 ГПа. Обсуждаются структурно-фазовые превращения и свойства после деформации сплавов Ni–Mn–In с разным соотношением Ni/Mn.

Ключевые слова: ферромагнитные сплавы, фазовые превращения, структура, деформация, кручение под давлением, микротвердость

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России (темы «Структура» г.р. № АААА-А18-118020190116-6, «Давление» г.р. № АААА-А18-118020190104-3) при частичной поддержке РФФИ (проект № 20–03–00056).

Scientific thesises

EVOLUTION OF MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES
OF Ni–Mn–In ALLOYS AFTER TORSIONAL
DEFORMATION UNDER HIGH PRESSURE

Yulia V. Kaletina^{*}, Andrey Yu. Kaletin, Vitaliy P. Pilyugin

M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

** kaletina@imp.uran.ru*

Abstract. Heusler alloys of the Ni–Mn–In system were investigated after torsional deformation under a pressure of 8 GPa. Structural-phase transformations

and properties after deformation of Ni–Mn–In alloys with different Ni/Mn ratios are discussed.

Key words: ferromagnetic alloys, phase transformations, structure, deformation, torsion under pressure, microhardness

Funding: the study was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of Russia (topics „Structure“ of the year no. AAAA18-118020190116-6, „Pressure“ of the year no. AAAA18-118020190104-3) with partial support of the RFBR (project no. 20-03-00056).

Многообразие различных эффектов и функциональных свойств сплавов Гейслера [1–4] делает их привлекательными для исследований и практического использования в качестве магнитных материалов в современной технике и микроэлектронике. Пластическая деформация является одним из эффективных способов управления структурно-фазовым состоянием материала, размером зерна, уровнем напряжений, особенно в случае применения интенсивных способов нагружения.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния деформационных воздействий на структуру и свойства новых синтезированных сплавов на основе системы Ni–Mn–In при замещении атомов никеля атомами марганца. С применением методов оптической металлографии, электронной просвечивающей и сканирующей микроскопии изучали структуру и характер изломов исследуемых сплавов, а также определяли микротвердость после интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением 8 ГПа.

Сплавы семейства Ni–Mn–In были выплавлены электродуговой плавкой в атмосфере аргона. В сплавах $\text{Ni}_{47-x}\text{Mn}_{42+x}\text{In}_{11}$ ($0 \leq x \leq 2$) менялось соотношение Ni/Mn, содержание индия оставалось неизменным. Исследуемые сплавы подвергали гомогенизирующему отжигу при температуре 1123 К в течение 24 ч. После отжига образцы деформировали в наковальнях Бриджмена методом кручения под давлением 8 ГПа. Степень деформации варьировали поворотом нижней наковальни от 0 до 5 оборотов.

Установлено [3; 4], что в сплавы $\text{Ni}_{47-x}\text{Mn}_{42+x}\text{In}_{11}$ ($0 \leq x \leq 2$), в которых изменяется соотношение Ni/Mn при практически постоянном содержании индия, в высокотемпературной области находятся в парамагнитном состоянии и имеют кубическую кристаллическую решетку, упорядоченную по типу $L2_1$. При охлаждении наблюдается маг-

нитный переход высокотемпературной $L2_1$ фазы из парамагнитного в ферромагнитное состояние, при этом температура Кюри аустенита $T_{CA} \approx 310$ К не зависит от состава и соотношения Ni/Mn. При дальнейшем охлаждении происходит мартенситное превращение, температура которого зависит от состава и понижается при уменьшении соотношения Ni/Mn с 1,12 в сплаве $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ до 1,02 в сплаве $Ni_{45}Mn_{44}In_{11}$.

После отжига при 1123 К в течение 24 ч структура исследуемых сплавов поликристаллическая. Все сплавы находились в крупнокристаллическом состоянии (рис. 1, а). Размер зерна в $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ — 200–500 мкм. В сплавах $Ni_{46}Mn_{43}In_{11}$ и $Ni_{45}Mn_{44}In_{11}$ зерно — 100 мкм. Изломы образцов всех сплавов после отжига хрупкие, межкристаллические, с участками скола (рис. 1, б). Микротвердость в сплавах $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$, $Ni_{46}Mn_{43}In_{11}$ в исходном состоянии — 3000 МПа, в сплаве $Ni_{45}Mn_{44}In_{11}$ — 4500 МПа.

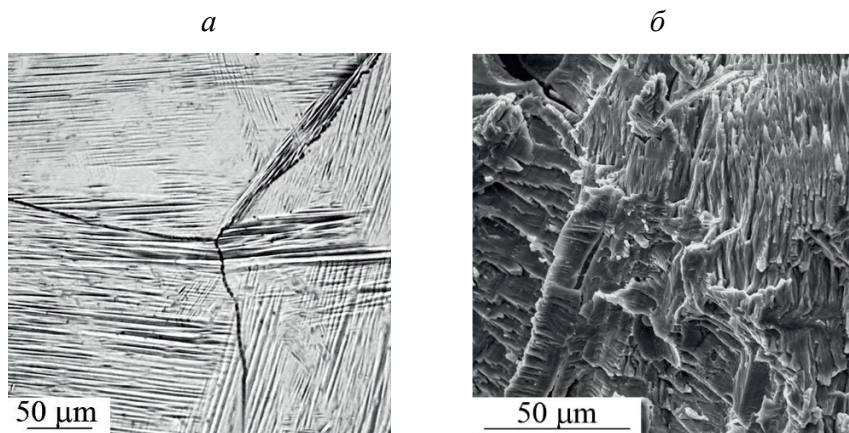


Рис. 1. Микроструктура сплава $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ (а) и поверхность излома сплава $Ni_{45}Mn_{44}In_{11}$ (б) после отжига

Пластическая деформация кручением под давлением 8 ГПа на разную степень приводит к существенным изменениям как микроструктуры, так и вида изломов сплавов $Ni_{47-x}Mn_{42+x}In_{11}$ (рис. 2). Установлено, что с увеличением степени деформации с ростом числа оборотов от 0 до 5 наблюдается изменение структуры и изломов. Электронно-микроскопические исследования показали, что структура измельчается. Сплав $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ переходит в нанокристаллическое состояние. После деформации на $n = 5$ оборотов во всех сплавах излом становится вязким.

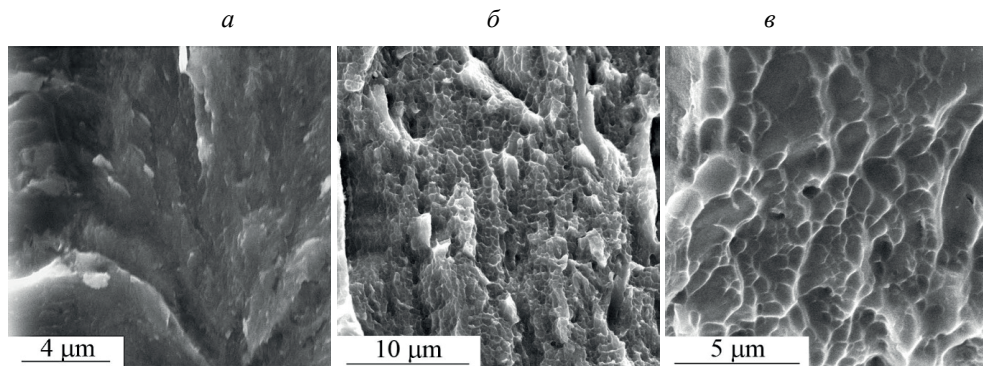


Рис. 2. Изломы сплавов $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ (а), $\text{Ni}_{46}\text{Mn}_{43}\text{In}_{11}$ (б), $\text{Ni}_{45}\text{Mn}_{44}\text{In}_{11}$ (в) после деформации кручением под высоким давлением 8 ГПа, угол поворота наковальни $n = 5$ оборотов

Измерения микротвердости показали, что максимальное упрочнение наблюдается после деформации кручением на 5 оборотов. В сплаве $\text{Ni}_{45}\text{Mn}_{44}\text{In}_{11}$ микротвердость составила 6500 МПа, в сплаве $\text{Ni}_{46}\text{Mn}_{43}\text{In}_{11}$ — 6550 МПа, а в сплаве $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$ — 6000 МПа. После такой обработки микротвердость возрастает практически в два раза по сравнению с исходным отожженным состоянием.

Таким образом, в сплавах на основе Ni–Mn–In с разным соотношением Ni/Mn после деформации под давлением формируется субмикро- или нанокристаллическая структура, в результате чего повышается микротвердость и улучшаются пластические свойства. Полученные результаты могут быть полезны при разработке методов деформационно-термических воздействий для функциональных материалов.

Список источников

1. Buchelnikov V. D., Sokolovskiy V. V. Magnetocaloric Effect in Ni–Mn–X (X = Ga, In, Sn, Sb) Heusler Alloys // *Physics of Metals and Metallography*. 2011. Vol. 112, No. 7. P. 633–665.
2. Счастливец В. М., Калетина Ю. В., Фокина Е. А. Мартенситное превращение в магнитном поле. Екатеринбург : УрО РАН, 2007. 322 с.
3. Индуцированные магнитным полем мартенситные превращения в сплавах $\text{Ni}_{47-x}\text{Mn}_{42+x}\text{In}_{11}$ ($0 \leq x \leq 2$) / Ю. В. Калетина [и др.] // *ФММ*. 2013. Т. 114, № 10. С. 911–918.
4. Калетина Ю. В., Герасимов Е. Г. Мартенситные превращения и магнитные свойства в нестехиометрических сплавах Ni–Mn–In // *ФТТ*. 2014. № 8. С. 1583–1588.

References

1. Buchelnikov V. D., Sokolovskiy V. V. Magnetocaloric Effect in Ni-Mn-X (X = Ga, In, Sn, Sb) Heusler Alloys // *Physics of Metals and Metallography*. 2011. Vol. 112, No. 7. P. 633–665.
2. Schastlivtsev V. M., Kaletina Yu. V., Fokina E. A. Martensitic Transformation in Magnetic Field. Yekaterinburg : UBRAS. 2007. 322 p.
3. Magnetic-Field-Induced Martensitic Transformation in $\text{Ni}_{47-x}\text{Mn}_{42+x}\text{In}_{11}$ Alloys (with $0 \leq x \leq 2$) / Yu. V. Kaletina [and al.] // *Physics of Metals and Metallography*. 2013. V. 114, No. 10. P. 838–844.
4. Kaletina Yu. V., Gerasimov E. G. Martensitic Transformation and Magnetic Properties of Nonstoichiometric Alloys of the Ni-Mn-In System // *Physics of the Solid State*. 2014. 2014. No. 8. P. 1634–1638.