

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТОИНДУЦИРОВАННОЙ МАРТЕНСИТНОЙ ДВОЙНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ В СПЛАВАХ ГЕЙСЛЕРА В РАЗНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Дильмиева Э.Т.¹, Кошкидько Ю.С.^{1,2}, Коледов В.В.¹, Шавров В.Г.¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия

²Институт низких температур и структурных исследований им. В. Тшебятовского
ПАН, Вроцлав, Польша
kelvit@mail.ru

Структура сплавов Гейслера изучается с использованием множества методов: оптической, растровой, просвечивающей, атомной силовой и фотоэмиссионной электронными микроскопиями, рентгеновской и нейтронной дифракциями [1,2]. Данные методы позволяют изучать особенности структуры сплавов Гейслера. В частности, зависимость микроструктуры от химического состава [2], наблюдение индивидуальных мартенситных пластин, идентификация кристаллической структуры сплавов [3], определение влияния микроструктуры на механизм деформации в результате многократных циркулирующих мартенситных переходов и соответствующий контроль разрушения [4], определение размеров мартенситных пластин [1], установление кристаллографии мартенсита, определение параметров двойникования [5]. Исследователи применяют также теоретические методы для описания мартенситного перехода [6]. Однако, особенностью изучаемых сплавов Гейслера является, то, что структурный фазовый переход индуцируется, как температурой, так и магнитным полем. Поэтому изучение эволюции микроструктуры при магнитоструктурном переходе под действием температуры и магнитного поля представляет большой интерес для исследователей [7,8]. По сравнению с экспоненциально растущим числом работ по сплавам Гейслера, всего лишь небольшая их часть посвящена изучению мартенситного перехода под действием внешних параметров. Эволюцию мартенситного перехода под действием температуры или магнитного поля фиксируют либо на видеозапись, либо на серию фотографий.

Исследования мартенситного перехода под действием температуры позволили изучить движение границ структурного перехода [8], процесс зародышеобразования и его влияния на эволюцию превращения [7], а также определить влияние теплового гистерезиса на движение границ фаз [7]. Результаты изучения мартенситного перехода под действием магнитного поля представлены в работах [9-11]. Известно, что для полного завершения структурного превращения в сплавах Гейслера необходимы высокие магнитные поля. Поэтому в работах [9,11] используют импульсные магнитные поля до 35.5 Тл, при этом считается, что условия эксперимента адиабатические из-за короткого времени воздействия импульса поля. Авторы [9] на основе полученных результатов оптического наблюдения за мартенситным переходом под действием импульсных магнитных полей до 31 Тл и данных из кривых намагниченности построили фазовую диаграмму от магнитного поля для сплава Гейслера семейства Ni-Co-Mn-In. Необходимо отметить, что в представленных работах изучение микроструктуры сплавов Гейслера в сильных магнитных полях проводилось в адиабатических условиях. Однако, при изотермических условиях превращение мартенсита в магнитных полях будет происходить иначе. На данный момент, работы по изучению структурного превращения в сплавах Гейслера в высоких магнитных полях в изотермических условиях в литературе неизвестны. С учетом нерешенных задач в области изучения магнитоиндуцированного мартенситного перехода в сплавах Гейслера в сильных магнитных полях авторы разработали метод исследования микроструктуры твердого тела в магнитном поле. Данный метод включает в себя операцию наблюдения поверхности металлографического шлифа при помощи оптического микроскопа, расположенного в поле биттеревского магнита, при одновременном точном локальном измерении температуры. С этой целью была создана специальная установка. Данная установка представляет собой оптический микроскоп, работающий в магнитных полях до 14 Тл и в температурном диапазоне от 77К до 423К, позволяющий проводить

металлографические исследования в *in-situ* режиме и измерять температуру образца [12]. Разработанная установка позволяет проводить исследования при адиабатических и изотермических условиях. Применение биттеревского магнита обусловлено следующим. Применение сверхпроводящих магнитов не позволяет проводить эксперименты при адиабатических условиях, т.к. время развёртки поля довольно большое. Это приводит к рассеиванию тепла в результате длительного намагничивания образца. Скорость развёртки поля в сверхпроводящем магните уступает скорости в биттеревском магните. Ограничение применения импульсных магнитных полей связано с малым временем импульса. Малое время импульса исключает проведение экспериментов по наблюдению микроструктуры в изотермических условиях [13]. Поэтому применение биттеревского магнита является оптимальным, т.к. позволяет проводить эксперименты с необходимой скоростью и для изотермических, и для адиабатических условий.

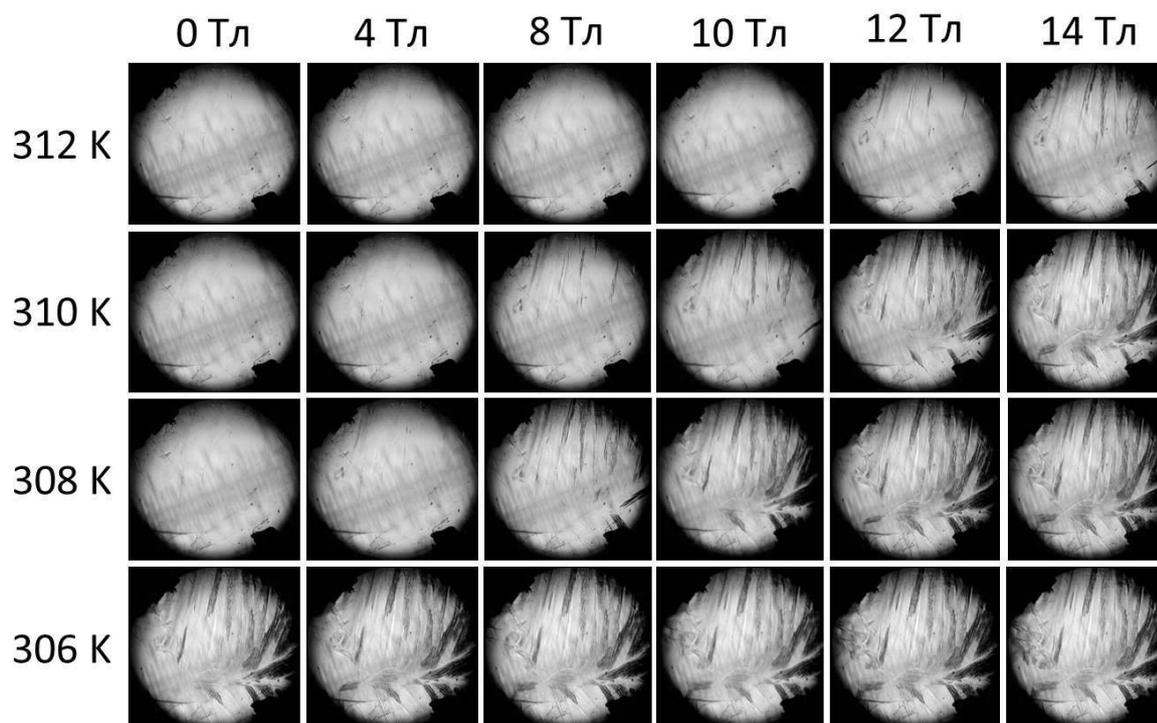


Рисунок 1 - Формирование мартенситной структуры под действием магнитного поля в образце сплава Гейслера $Ni_{2.16}Mn_{0.84}Ga$ при различных начальных температурах эксперимента $T_{нач}$, установленных после охлаждения, в изотермических условиях (размер кадра $2 \times 2 \text{ мм}^2$) [12]

В качестве образцов были выбраны сплавы Гейслера, актуальные на данный момент в качестве рабочего тела в холодильных машинах: поликристалл $Ni_{2.16}Mn_{0.84}Ga$ ($T_{AM} > T_{комн}$) [14], поликристалл $Ni_{43}Mn_{46}Sn_{11}$ ($T_{AM} \ll T_{комн}$) [15,16] и монокристалл $Ni_{2.19}Mn_{0.81}Ga$ ($T_{AM} > T_{комн}$) [17]. По результатам исследований получены видеозаписи процесса эволюции мартенситных двойников при структурном переходе под действием магнитного поля до 14 Тл с одновременной фиксацией изменения температуры образцов с прямым и обратным МКЭ (рис. 1). Обнаружена разница протекания магнитоиндуцированного фазового перехода 1-го рода при адиабатических и изотермических режимах. Разработана качественная модель, объясняющая разницу протекания магнитоструктурного перехода образца сплава Гейслера $Ni_{2.16}Mn_{0.84}Ga$ при разных термодинамических условиях. В образце $Ni_{43}Mn_{46}Sn_{11}$ продемонстрировано влияние оставшейся структуры мартенсита в результате отсутствия термоциклирования на значения изотермического выделения/поглощения тепла. В монокристаллическом сплаве Гейслера $Ni_{2.19}Mn_{0.81}Ga$ обнаружено, что после

термоциклирования для зарождения мартенситной фазы необходимо большее магнитное поле, чем при отсутствии дополнительного нагрева. На основе полученных результатов построены ($T-\mu_0H$) фазовые диаграммы фазового перехода 1-го рода для сплавов Гейслера $Ni_{2.16}Mn_{0.84}Ga$, $Ni_{43}Mn_{46}Sn_{11}$, $Ni_{2.19}Mn_{0.81}Ga$ до 14, 12 и 10 Тл, соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-07-01320.

Литература

- [1] P. Czaja, W. Maziarz, et.al., // *Intermetallics* 55, 1 (2014).
- [2] T. Krenke, M. Acet, et.al., // *Phys. Rev. B.* 72, 014412 (2015).
- [3] W. Maziarz // *Sol. State Phen.* 186, 251 (2012).
- [4] P. Czaj, R. Chulist, et.al., // *J. Mater. Sci.* 52, 10 (2012).
- [5] R.C. Pond, B. Muntifering, P. Mullner // *Acta Materialia.* 60, 9 (2012).
- [6] R. Niemann, S. Fahler // *J. Alloys Comp.* 703, 280 (2017).
- [7] Gottschall, K.P. Skokov, et.al., // *Appl. Phys. Lett.* 106, 021901 (2015).
- [8] R.M. Grechishkin, O.V. Gasanov, et.al., // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 77, 012045 (2015).
- [9] T. Kihara, I. Katakura, et.al., // *J. Alloys Comp.* 577, S722 (2013).
- [10] M. R. Sullivan, D. A. Ateya, et.al., // *J. Appl. Phys.* 95, 11 (2004).
- [11] X. Xu, I. Katakura, T. Kihara, et.al., // *Mater. Trans.* 54, 3 (2013).
- [12] E.T. Dilmieva, et.al., *Bulletin RAS. Physics* 81 (2017) 1428-1434.
- [13] T. Kihara, X. Xu, W. Ito, et.al., // *Phys. Rev. B.* 90, 214409 (2014).
- [14] V.V. Khovailo, V. Novosad, et.al., *Phys. Rev. B* 70, 174413 (2004).
- [15] H. Xiao, C. Yang, R. Wang, et.al., *Phys. Lett. A*, 380, 3414 (2016).
- [16] Z.D. Han, D.H. Wang, et.al., *Mater. Scien. Engin. B* 157, 40 (2009).
- [17] A.N. Vasil'ev, E.I. Estrin, V.V. Khovailo, et.al., *Inter. J. Appl. Electromagn. Mech.* 12, 35 (2000).