

УДК 669.866.018:448.7

ВОЗНИКНОВЕНИЕ АНТИФЕРРОМАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В СПЛАВАХ $\text{Mn}_{19.8-x}\text{Fe}_x\text{Sn}_{0.2}$ СО СТРУКТУРОЙ ТИПА $\beta\text{-Mn}$

И. Ю. Гайдукова, А. С. Илюшин, К. Иноуе^{*)}, И. А. Никанорова,
А. С. Маркосян, З. С. Умхаева^{**)}

(кафедра физики твердого тела; кафедра общей физики
и магнитоупорядоченных сред)

E-mail: sols146i@phys.msu.su

Выявлено магнитное состояние сплавов системы $\text{Mn}_{19.8-x}\text{Fe}_x\text{Sn}_{0.2}$ и определены закономерности изменения их свойств в зависимости от содержания железа.

Парамагнетизм β -марганца является предметом многочисленных дискуссий, и сплавы на основе $\beta\text{-Mn}$ привлекают внимание многих исследователей [1–6]. В частности, этот интерес обусловлен проблемой локального окружения атомов Mn и магнитного состояния в разбавленных сплавах на основе $\beta\text{-Mn}$. Аллотропная модификация $\beta\text{-Mn}$ имеет кубическую кристаллическую структуру типа A13, пространственная группа $R\bar{4}_132$. Двадцать атомов Mn, образующие элементарную ячейку, распределены по двум кристаллографически неэквивалентным позициям $8c$ и $12d$ [7, 8], причем атомы Mn в позициях $12d$ имеют меньший радиус, нежели атомы Mn в позициях $8c$ и их электронные конфигурации различны.

Исходя из результатов ЯМР исследований сплавов $\beta\text{-Mn}_{1-x}\text{Al}_x$ авторы [9] пришли к заключению, что в магнитном отношении атомы Mn в различных позициях ведут себя практически независимо, и только позиции $12d$ являются «магнитными» (было показано, что за возникновение состояния спинового стекла в этой системе сплавов ответственны лишь атомы Mn в местах $12d$, тогда как атомы марганца, занимающие позиции $8c$, остаются немагнитными). Соответственно в парамагнитном $\beta\text{-Mn}$ атомы в позициях $12d$ дают доминирующий вклад в антиферромагнитные спиновые флуктуации. В позициях $12d$ атомы марганца образуют сетку из правильных треугольников. При этом каждый атом, расположенный в этой позиции, связан с шестью другими атомами в позициях $12d$ так, что три треугольника имеют общую вершину. Такая геометрия наряду с антиферромагнитным Mn–Mn обменным взаимодействием приводит к тому, что в $\beta\text{-Mn}$ возникают фрустрированные связи, не позволяющие установиться какой-либо одной равновесной антиферромагнитной структуре. Вследствие этого

не удается стабилизировать дальний магнитный порядок в $\beta\text{-Mn}$ [9].

Рядом авторов изучались структура и свойства систем со структурой типа $\beta\text{-Mn}$, в которые вводились небольшие количества немагнитных (Sn, Al) или магнитных (Fe) атомов [4–6, 9–12]. Рентгеновский дифракционный анализ позволил заключить, что при замещениях атомы Al занимают почти исключительно (90%) «магнитные» позиции $12d$ [9]. Такой же вывод был сделан и для атомов Sn при анализе мёссбауэровских спектров сплавов $\beta\text{-Mn}_{19.3-x}\text{Sn}_{0.7}\text{Fe}_x$ [6]. Одновременно было показано, что атомы железа имеют сильное предпочтение к «немагнитным» позициям $8c$. Такое предпочтительное замещение обуславливает различное локальное окружение атомов Mn в сплавах $\beta\text{-Mn}_{1-x}\text{M}_x$ в зависимости от замещающего элемента M и как следствие существенную зависимость их физических свойств от M.

На основе анализа мёссбауэровских и нейтронографических экспериментальных данных авторы работ [3, 4, 13, 14] пришли к заключению, что при замещениях Mn на атомы Sn в этих сплавах возникает антиферромагнитное упорядочение. Такие же результаты были получены в работе [15] при изучении сплавов $\text{Mn}_{20-x}\text{Fe}_x$, $\text{Mn}_{19.9-x}\text{Fe}_{0.1}\text{Sn}_x$ и $\text{Mn}_{16-x}\text{Fe}_4\text{Sn}_x$, содержащих одновременно как атомы Sn, так и атомы Fe. Тем не менее до настоящего времени остались неясными некоторые особенности магнитного поведения сплавов на основе модификаций Mn. В частности, не были изучены концентрационные зависимости магнитных свойств ряда квазибинарных систем, и не было установлено их магнитное состояние. Ряд данных в литературе противоречив. Так, в работе [9] сделан вывод об отсутствии антиферромагнитного упорядочения в системе $\beta\text{-Mn}_{20-x}\text{Al}_x$, а в [5] указывается на возможное отсутствие дальнего магнитного порядка также и в сплавах $\beta\text{-Mn}_{19.8-x}\text{Fe}_x\text{Sn}_{0.2}$. С целью установления магнитного состояния в системе $\text{Mn}_{19.8-x}\text{Fe}_x\text{Sn}_{0.2}$ и выяснения закономерностей

^{*)} Institute of Molecular Science, Nishigounaka 38, Myodaiji, Okazaki, Aichi 444-8585, Japan.

^{**)} Чеченский государственный университет, г. Грозный.

изменения их свойств при изменении содержания железа в настоящей работе были изучены их намагниченность и магнитная восприимчивость при низких температурах.

Образцы сплавов $\text{Mn}_{19.8-x}\text{Fe}_x\text{Sn}_{0.2}$ с $x = 0.0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 6.2$ и 6.4 были синтезированы в индукционной печи. Для гомогенизации выплавленные слитки отжигались в течение 100 ч при 900°C и закаливались в воду. Рентгеновский фазовый анализ показал, что все образцы рентгеновски однофазны и изоструктурны β -модификации марганца. С увеличением концентрации железа от $x = 0$ до $x = 6.4$ параметр элементарной ячейки монотонно уменьшается от 6.302 до 6.272 \AA .

Измерения намагниченности и восприимчивости в постоянном магнитном поле производились на СКВИД магнитометре (Quantum Design) в температурном интервале $1.8\text{--}400 \text{ K}$ и полях до 10 кЭ .

На рис. 1 приведены кривые температурных зависимостей восприимчивости сплавов системы $\text{Mn}_{19.8-x}\text{Fe}_x\text{Sn}_{0.2}$, полученные в постоянном поле 1000 Э . Как видно, все кривые однотипны и имеют вид λ -зависимостей с четко выраженными максимумами в области температур $15\text{--}40 \text{ K}$. Подобная картина с аналогичными максимумами на зависимостях $\chi(T)$ наблюдалась и в работе [15] в близких по составу антиферромагнитных сплавах $\text{Mn}\text{--}\text{Fe}$ и $\text{Mn}\text{--}\text{Sn}$ со структурой $\beta\text{-Mn}$. Чтобы выяснить характер магнитного упорядочения ниже температуры возникновения максимума и установить возможное влияние примесных магнитных фаз, были получены кривые намагничивания для этих сплавов. Результаты этих измерений, проведенные при температуре 4 K , приведены на рис. 2. Видно, что все они практически одинаковы и намагниченность демонстрирует линейную зависимость от поля. Это указывает на антиферромагнитный характер магнитного упорядочения. Величина намагниченности в фиксированном магнитном поле практически не зависит от концентрации железа.

Тем не менее с помощью более детальных измерений было обнаружено, что намагниченности всех исследованных сплавов при низких температурах зависят от магнитной предыстории. В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости, иллюстрирующие поведение намагниченности сплава $\text{Mn}_{15.8}\text{Fe}_4\text{Sn}_{0.2}$ при повышении температуры от 4 до 30 K , предварительно охлажденного в нулевом поле и в поле 10 кЭ . Видно, что при температуре ниже 22 K образец, охлажденный в нулевом поле, все-таки обладает небольшой остаточной намагниченностью. На вставке, где показана область перехода в увеличенном по оси ординат масштабе, видно, что при этой температуре на обеих зависимостях $M(H)$ отсутствует максимум. Отметим, что температура Нееля этого сплава составляет 34 K , т. е. существенно ниже. Поскольку изменение остаточного сигнала намагниченности M_r в этой

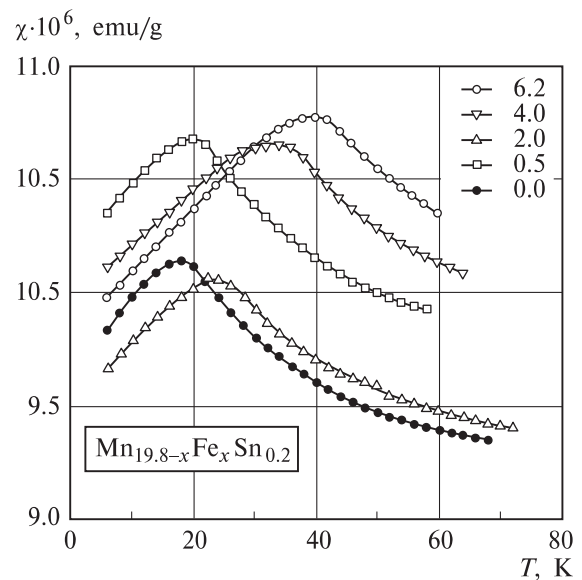


Рис. 1. Температурные зависимости восприимчивости сплавов системы $\text{Mn}_{19.8-x}\text{Fe}_x\text{Sn}_{0.2}$ в постоянном поле 1000 Э

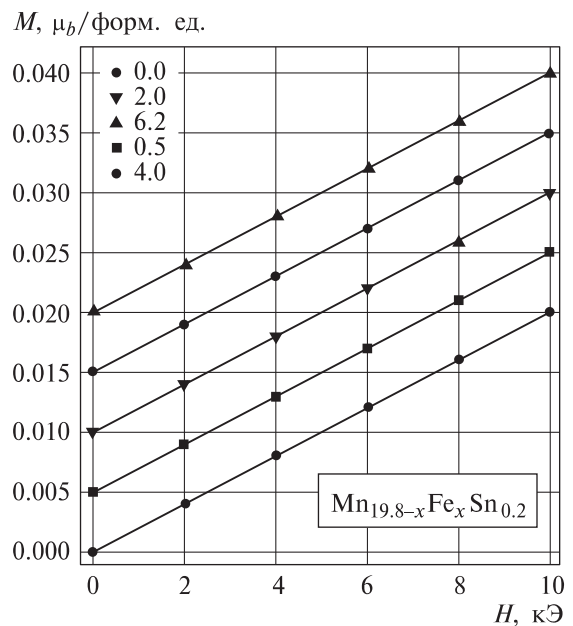


Рис. 2. Полевые зависимости намагниченности сплавов системы $\text{Mn}_{19.8-x}\text{Fe}_x\text{Sn}_{0.2}$ при температуре 4 K

системе в зависимости от x является нерегулярным, можно предположить, что оно обусловлено примесями. Возможно, однако, что при низких температурах в этих сплавах происходит переход в состояние возвратного спинового стекла с антиферромагнитными корреляциями.

На рис. 4 приведена концентрационная зависимость температуры максимума $\chi(T)$, соответствующая T_N . Видно, что при изменении концентрации железа от $x = 0$ до $x = 6.0$ температура Нееля T_N монотонно возрастает от 17 до 40 K . Последнее

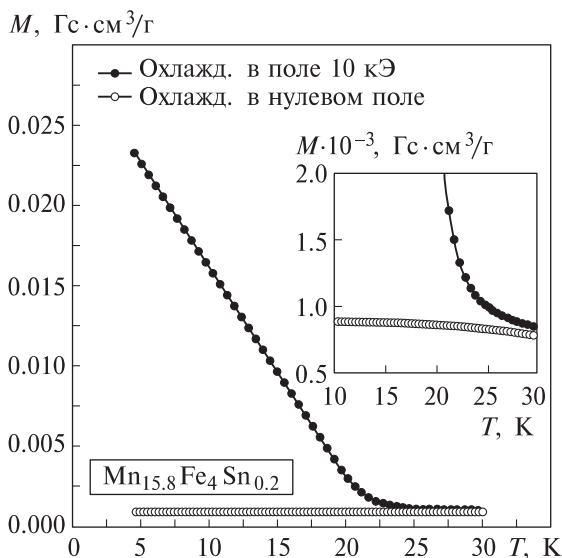


Рис. 3. Температурная зависимость намагниченности сплава $\text{Mn}_{15.8}\text{Fe}_4\text{Sn}_{0.2}$, предварительно охлажденного в нулевом поле и поле 10 кЭ

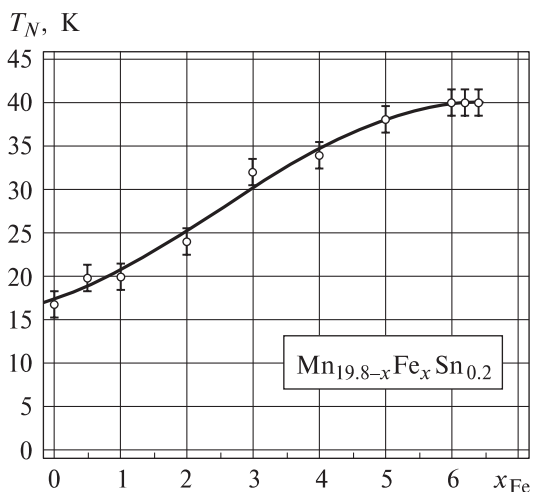


Рис. 4. Концентрационная зависимость температуры Нееля сплавов системы $\text{Mn}_{19.8-x}\text{Fe}_x\text{Sn}_{0.2}$

значение x определено как концентрация твердого раствора железа в β -Mn, что хорошо согласуется с данными рентгенофазового анализа.

Таким образом, показано, что в сплаве $\text{Mn}_{19.8}\text{Sn}_{0.2}$ со структурой β -Mn возникает антиферромагнитное упорядочение. Отличие этого сплава от изотипных сплавов $\text{Mn}_{1-x}\text{Al}_x$, в которых отсутствует дальний магнитный порядок, обусловлено существенным различием в величине межатомных расстояний. В твердых растворах $\text{Mn}_{19.8-x}\text{Fe}_x\text{Sn}_{0.2}$, где атомы Fe замещают Mn преимущественно в «немагнитных» позициях $8c$, магнитное упорядочение сохраняется, а T_N возрастает по мере замещения.

Литература

1. Shiga M., Yoshimoto K., Nakamura H., Wada H. // Proc. Intern. Conf. Phys. Trans. Met. / Eds. P.M. Oppeneer, J. Kuebler. Singapore, 1993. P. 1008.
2. Shiga M., Nakamura H., Nishi M., Kakurai K. // J. Phys. Soc. Jap. 1994. **63**. P. 1656.
3. Nakai Y. // J. Phys. Soc. Jap. 1994. **63**. P. 775.
4. Nakai Y. // J. Phys. Soc. Jap. 1996. **65**. P. 1787.
5. Андрианов А.В., Васильев А.Н., Виноградова А.С. и др. // ФММ. 1998. **85**. С. 70.
6. Русаков В.С., Илюшин А.С., Виноградова А.С. и др. // Изв. РАН. Металлы. 1999. **63**. С. 91.
7. Preston G.D. // Phil. Mag. 1928. **5**. P. 1207.
8. Крипякевич П.И. // Кристаллография. 1960. **5**. С. 273.
9. Nakamura H., Yoshimoto K., Shiga M. et al. // J. Phys. Condens. Matter. 1997. **9**. P. 4701.
10. Kohori Y., Noguchi Y., Kohara T. // J. Phys. Soc. Jap. 1993. **62**. P. 447.
11. Виноградова А.С., Илюшин А.С., Никанорова И.А., Русаков В.С. // ФТТ. 1997. **39**. С. 1437.
12. Shiga M., Nakamura H., Nishi M., Kakurai K. // J. Magn. Magn. Matter. 1995. **140-144**. P. 2009.
13. Kimball C.W., Sill I.R. // Phys. Rev. B. 1970. **1**. P. 3953.
14. Dunlop J.B., Williams J. M., Crangle J. // Physica B. 1997. **86-88**. P. 269.
15. Noshikawa Y., Ogawa S., Waki S. // J. Phys. Soc. Jap. 1977. **42**. P. 845.

Поступила в редакцию
22.05.06