

05

Релаксационный процесс магнитных моментов в инварных сплавах, легированных хромом

© Ш.М. Алиев, Ж.Г. Ибаев, М.Ш. Алиев

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия
E-mail: ibaev77@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 мая 2022 г.

В окончательной редакции 3 августа 2022 г.

Принято к публикации 4 августа 2022 г.

Магнитным и мессбауэровским методами исследованы инварные сплавы $\text{Ni}_{31}(\text{Fe}_{69-x}\text{Cr}_x)$ ($x = 3, 4, 6$ и $8 \text{ at.}\%$) в области температур $120\text{--}400 \text{ K}$. Обнаружено отсутствие магнитной сверхтонкой структуры ядер ^{57}Fe в магнитоупорядоченной области температур для сплавов с $x = 6$ и $8 \text{ at.}\%$. Магнитную структуру сплавов можно представить как систему суперпарамагнитных кластеров, магнитные моменты которых релаксируют между разнорасположенными энергетическими уровнями. Явление объясняется повышенной частотой релаксации магнитных моментов между этими уровнями.

Ключевые слова: инварный сплав, намагниченность, температура Кюри, магнитный момент, релаксационный процесс, эффект Мессбауэра.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.18.53396.19265

Инварами обычно называют сплавы с ГЦК-решеткой системы Fe–Ni с содержанием Ni, равным $25\text{--}40 \text{ at.}\%$. Физические свойства этих сплавов отличаются рядом особенностей аномального характера. К ним относятся поведение температурного коэффициента линейного расширения, резкая зависимость намагниченности насыщения от состава, высокие значения магнитной восприимчивости парапроцесса и магнитоупорядоченности [1]. Магнитная структура инварных сплавов неоднородна, в них одновременно могут существовать ферро- и антиферромагнитные компоненты [2,3]. В зависимости от состава сплава каждая из этих компонент может присутствовать в сплаве в виде кластеров в матрице другой компоненты [3].

В настоящей работе исследовались температурные зависимости эффекта Мессбауэра и намагниченности инварных сплавов с примесью хрома $\text{Ni}_{31}(\text{Fe}_{69-x}\text{Cr}_x)$ ($x = 3, 4, 6$ и $8 \text{ at.}\%$). Цель исследований заключалась в сравнении температур магнитного упорядочения, полученных из магнитных (температура Кюри T_C) и мессбауэровских (T_M) измерений. Отметим, что легирование хромом уменьшает T_C сплава в зависимости от концентрации хрома, сохраняя при этом довольно высокую крутизну кривой намагниченности в области T_C . Поэтому инварные сплавы, легированные хромом, применяются в тепловых преобразователях энергии в качестве термомагнитных материалов с заданными значениями T_C [4,5].

Измерения намагниченности проводились в интервале температур $120\text{--}400 \text{ K}$ на вибрационном магнитометре ВМ2-А. Мессбауэровские спектры ядер ^{57}Fe измерялись на спектрометре ЯГРС-4М с источником γ -излучения $^{57}\text{Co}(\text{Cr})$. Образцы для мессбауэровских

измерений представляли собой диски диаметром 15 mm и толщиной $30 \mu\text{m}$, вырезанные из слитков сплавов и подвергнутые шлифовке с помощью алмазной пасты. Для проведения температурных измерений образец помещался в комбинированную с криостатом температурную камеру с плавной регулировкой температур в интервале $120\text{--}400 \text{ K}$. Автоматическая терморегулировка обеспечивала поддержание заданной температуры с точностью $\pm 0.5^\circ$. Температура Кюри T_C сплава определялась по температурной зависимости намагниченности, а T_M — по началу уширения на половине высоты линии поглощения парамагнитного мессбауэровского спектра.

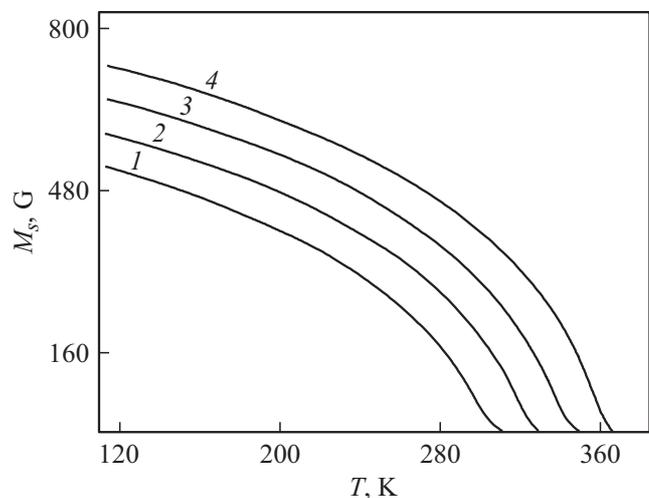


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности насыщения сплавов $\text{Ni}_{31}(\text{Fe}_{69-x}\text{Cr}_x)$. $x = 8$ (1), 6 (2), 4 (3) и $3 \text{ at.}\%$ (4).

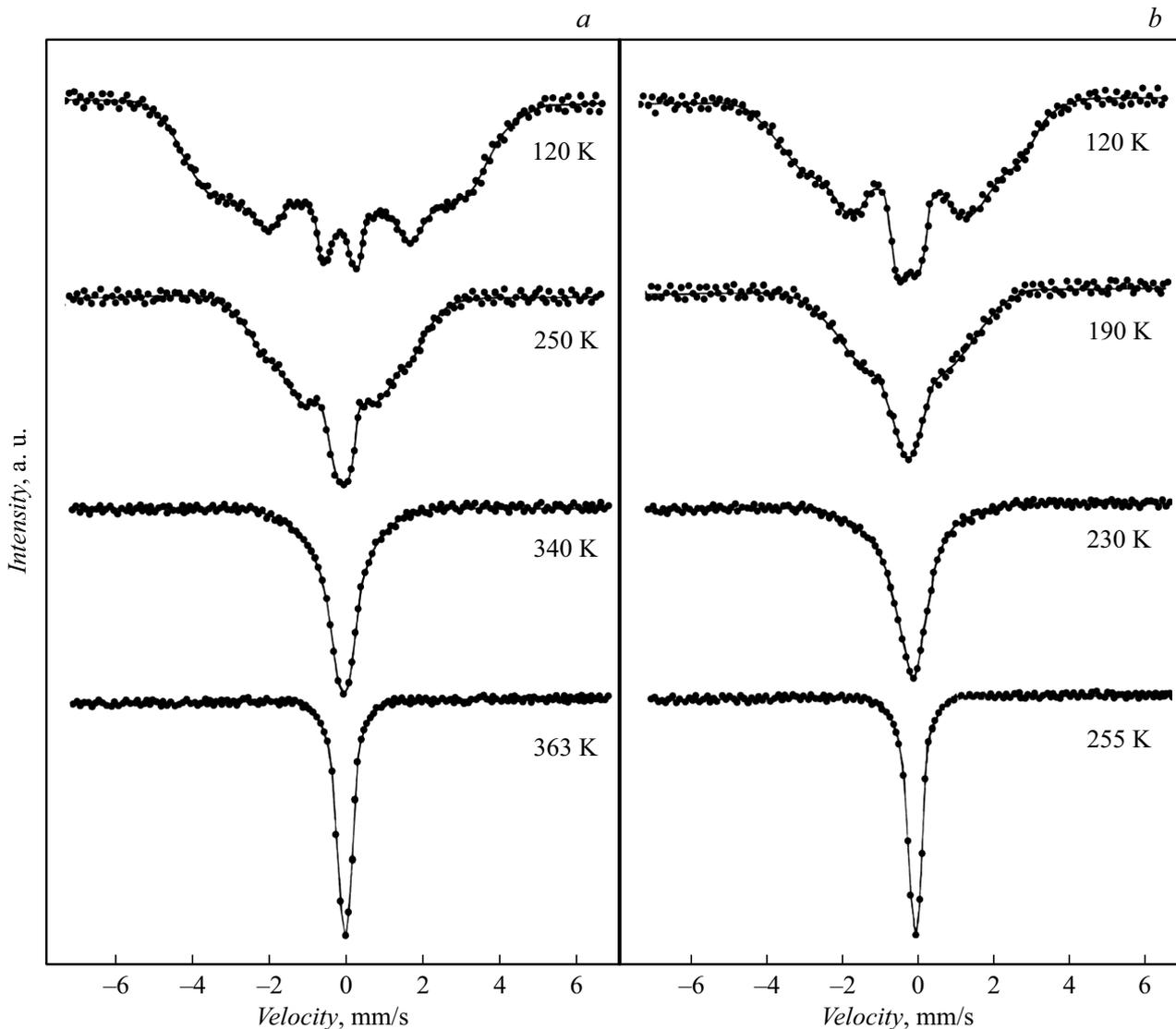


Рис. 2. Мессбауэровские спектры сплавов $\text{Ni}_{31}(\text{Fe}_{69-x}\text{Cr}_x)$ при различных температурах. $x = 3$ (a) и 8 at.% (b).

Значения температур магнитного упорядочения (в K) сплавов $\text{Ni}_{31}(\text{Fe}_{69-x}\text{Cr}_x)$, полученных по магнитным (T_C) и мессбауэровским (T_M) измерениям

| Температура | x , at.% | | | |
|-------------------------|------------|-----|-----|-----|
| | 3 | 4 | 6 | 8 |
| $T_C (\pm 3 \text{ K})$ | 363 | 344 | 323 | 302 |
| $T_M (\pm 3 \text{ K})$ | 363 | 344 | 290 | 255 |

На рис. 1 приведены температурные зависимости намагниченности насыщения $M_s(T)$ сплавов, а на рис. 2 — мессбауэровские спектры сплавов с $x = 3$ и 8 at.%. Спектры имеют вид релаксационных спектров, для которых характерно значительное уширение внешних линий поглощения магнитной сверхтонкой структуры

(МСТС) ядер ^{57}Fe [6]. На рис. 3 приведены температурные зависимости начала уширения линий поглощения парамагнитных мессбауэровских спектров сплавов $\text{Ni}_{31}(\text{Fe}_{69-x}\text{Cr}_x)$. С понижением температуры уширение линии поглощения спектра постепенно повышается за счет появления в спектре неразрешенной МСТС ядер ^{57}Fe . Анализ полученных спектров проводился с помощью программы Univem MS. Полученные значения T_C и T_M приведены в таблице.

Видно, что для сплавов с $x = 6$ и 8 at.% наблюдается разница в значениях T_C и T_M , причем $T_M < T_C$. Отметим, что мессбауэровская спектроскопия успешно применяется для исследования структурных и магнитных свойств магнитных материалов, содержащих частицы или кластеры нанометрового размера [7–9]. Экспериментально было показано, что в инварных сплавах исследуемых составов антиферромагнитная компонента

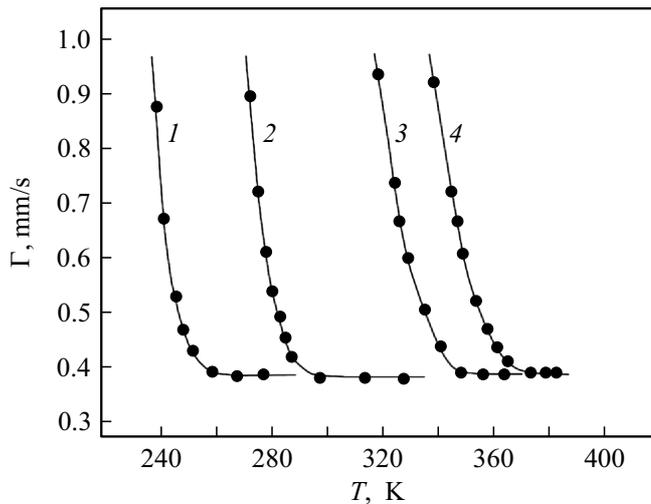


Рис. 3. Температурные зависимости начала уширения линий поглощения парамагнитных мессбауэровских спектров сплавов $\text{Ni}_{31}(\text{Fe}_{69-x}\text{Cr}_x)$. $x = 8$ (1), 6 (2), 4 (3) и 3 ат.%. (4).

может присутствовать в виде кластеров в ферромагнитной матрице [2,3]. В таких сплавах температура Кюри T_C ферромагнитной компоненты значительно превышает температуру Нееля T_N антиферромагнитной компоненты [3]. В то же время из-за присутствия обменного взаимодействия между обеими компонентами антиферромагнитная компонента не переходит в парамагнитное состояние вплоть до T_C ферромагнитной компоненты [3]. В результате объем ферромагнитной матрицы сплава становится ближе по своей природе к системе суперпарамагнитных кластеров [3]. Об этом свидетельствуют релаксационные формы мессбауэровских спектров (рис. 2). Учитывая эти особенности магнитной структуры в области T_C , объем ферромагнитной матрицы сплава можно представить как систему суперпарамагнитных кластеров, магнитные моменты которых релаксируют между разнозаселенными энергетическими уровнями [10]. Более конкретно релаксация между состояниями кластера с противоположными направлениями магнитного момента происходит как процесс перехода между разными значениями уровня энергии. В этом случае во временном интервале релаксационного процесса магнитного момента кластера между противоположными направлениями одно из направлений преобладает над обратным.

Условием наблюдения МСТС в экспериментах по эффекту Мессбауэра является соотношение [6]:

$$\omega_L \tau_s \geq 1, \quad (1)$$

где ω_L — частота ларморовской прецессии ядерных спинов в эффективном магнитном поле H_e на ядре, τ_s — время релаксации электронных спинов, создающих это поле, т.е. характерное время флуктуации эффективного поля на ядре.

Очевидно, для сплавов с $x = 6$ и 8 ат.% при $T \geq T_M$ условие (1) не выполняется, т.е. при приближении к T_C $\omega_L \tau_s < 1$. С учетом разнозаселенности энергетических уровней при намагничивании системы суперпарамагнитных кластеров во временном интервале релаксационного процесса магнитных моментов направление намагничивающего поля H будет преобладать над обратным. В такой системе, естественно, будет фиксироваться магнитоупорядоченное состояние как коллективное явление независимо от времени релаксации магнитных моментов. Но если в релаксационном процессе магнитных моментов кластеров соотношение (1) не выполняется, то мессбауэровские спектры не будут фиксировать МСТС ядер ^{57}Fe в такой системе, т.е. в этом случае ядерный спин не будет успевать прецессировать относительно направления эффективного магнитного поля, создаваемого в области ядра электронным спином. При $T = T_C$ временной интервал релаксационного процесса магнитных моментов кластеров между противоположными направлениями выравнивается, и система переходит в парамагнитное состояние.

Таким образом, при приближении к температуре Кюри T_C магнитную структуру инварных сплавов, легированных хромом, можно представить как систему суперпарамагнитных кластеров, магнитные моменты которых релаксируют между разнозаселенными энергетическими уровнями. Отсутствие МСТС ядер ^{57}Fe в магнитоупорядоченной области температур можно объяснить повышенной частотой релаксации магнитных моментов кластеров между этими уровнями.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.И. Захаров, *Физика прецизионных сплавов с особыми тепловыми свойствами* (Металлургия, М., 1986).
- [2] В.И. Гоманьков, Е.В. Козис, Б.Н. Мохов, *ЖЭТФ*, **70** (1), 327 (1976). [V.I. Goman'kov, E.V. Kozis, B.N. Mokhov, *JETP*, **43** (1), 170 (1976).]
- [3] В.Е. Роде, *ЖЭТФ*, **75** (2), 780 (1978). [V.E. Rode, *JETP*, **48** (2), 394 (1978).]
- [4] Ш.М. Алиев, *Магнитно-тепловой двигатель*, патент на изобретение № 2006675 (приоритет от 28.02.1991).
- [5] Ш.М. Алиев, И.К. Камиллов, М.Ш. Алиев, *ДАН*, **424** (3), 329 (2009). [Sh.M. Aliev, I.K. Kamilov, M.Sh. Aliev, *Dokl. Phys.*, **54**, 18 (2009). DOI: 10.1134/S1028335809010054].
- [6] И.П. Суздаев, *Динамические эффекты в гамма-резонансной спектроскопии* (Атомиздат, М., 1979).
- [7] М.А. Чуев, *Письма в ЖЭТФ*, **98** (8), 523 (2013). [M.A. Chuev, *JETP Lett.*, **98**, 465 (2013). DOI: 10.1134/S0021364013210029].
- [8] М.А. Чуев, *Письма в ЖЭТФ*, **99** (5), 319 (2014). [M.A. Chuev, *JETP Lett.*, **99**, 278 (2014). DOI: 10.1134/S0021364014050063].

- [9] Ш.М. Алиев, Ж.Г. Ибаев, М.Ш. Алиев, Письма в ЖТФ, **45** (19), 47 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.19.48319.17897 [Sh.M. Aliev, Zh.G. Ibaev, M.Sh. Aliev, Tech. Phys. Lett., **45**, 1004 (2019). DOI: 10.1134/S106378501910002X].
- [10] А.М. Афанасьев, М.А. Чуев, Письма в ЖЭТФ, **74** (2), 112 (2001). [A.M. Afanas'ev, M.A. Chuev, JETP Lett., **74**, 107 (2001). DOI: 10.1134/1.1405896].