

УДК 537.622.4

СВОЙСТВА МЕТАМАГНИТНОГО СПЛАВА $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

© 2015 г. А. П. Каманцев^{1,2}, В. В. Коледов^{1,2}, А. В. Маширов^{1,2}, Э. Т. Дильмиева¹, В. Г. Шавров¹, Я. Цвик², И. С. Терешина^{2,3}, М. В. Лянге⁴, В. В. Ховайло^{4,5}, Дж. Поркари^{2,6}, М. Топич⁷

E-mail: kama@cplire.ru

Отработана методика дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) материалов в сильных магнитных полях. На основе элементов Пельтье изготовлен дифференциальный калориметр для работы в полях биттеровского магнита (до 140 кЭ). Проведены калориметрические исследования образцов сплава $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$ с обратным магнитокалорическим эффектом (МКЭ) вблизи метаманнитоструктурного фазового превращения (ФП). Показано, что с ростом магнитного поля скрытая теплота перехода снижается как при прямом, так и при обратном превращении.

DOI: 10.7868/S0367676515090100

В последние годы большой практический и фундаментальный интерес вызывают сплавы семейства Fe–Rh. Они привлекли внимание исследователей магнитокалорических свойств магнетиков еще в 1980-х годах, и до сих пор являются рекорсменами по величине обратного МКЭ: $\Delta T = -12.9$ К в магнитном поле 19.5 кЭ [1]. Сплавы с составом, близким к эквиаtomному, проявляют аномально высокую намагниченность насыщения в ферромагнитной фазе (до $130 \text{ Гс} \cdot (\text{г} \cdot \text{см}^3)^{-1}$) [2], а также обладают рядом уникальных свойств, таких как гигантский МКЭ [1], эластокалорический [3] и барокалорический [4] эффекты, которые проявляются вблизи метаманнитоструктурного ФП 1-го рода. Также интерес представляют ФП, происходящие в эпитаксиальных поликристаллических тонких пленках Fe–Rh, для потенциального применения в об-

ласти термомагнитной записи [5] или в резистивных ячейках памяти [6].

В настоящей работе исследуются термомагнитные свойства быстроохлажденного сплава $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$ как перспективного материала для магнитного охлаждения при помощи методик ДСК в сильных магнитных полях. Обе кристаллические фазы сплава $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$ имеют ОЦК-структуру типа CsCl, но с разными параметрами решетки, так как при обратном ФП происходит изотропное увеличение объема на 1% [7]. При помощи SQUID-магнитометра получены полевые зависимости

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт радиотехники и электроник имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Москва.

² Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур, Вроцлав, Польша.

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова Российской академии наук, Москва.

⁴ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва.

⁵ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики.

⁶ Университет Пармы, Италия.

⁷ Университет Кейптауна, ЮАР.

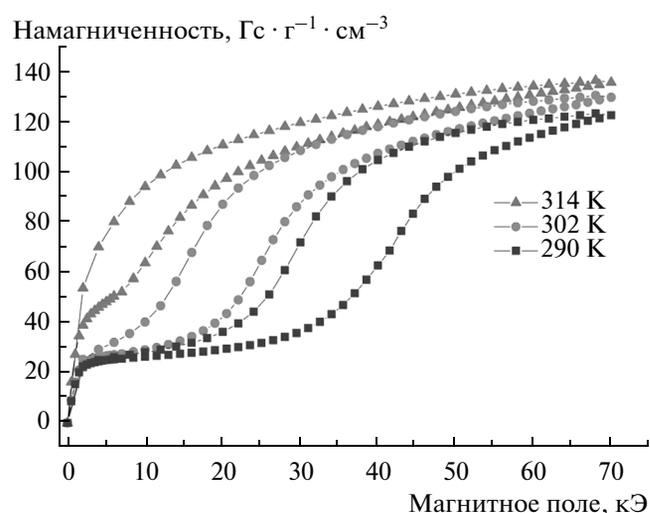


Рис. 1. Полевая зависимость намагниченности образца сплава $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$ при разных температурах: (▲) — 314 К; (●) — 302 К; (■) — 290 К.

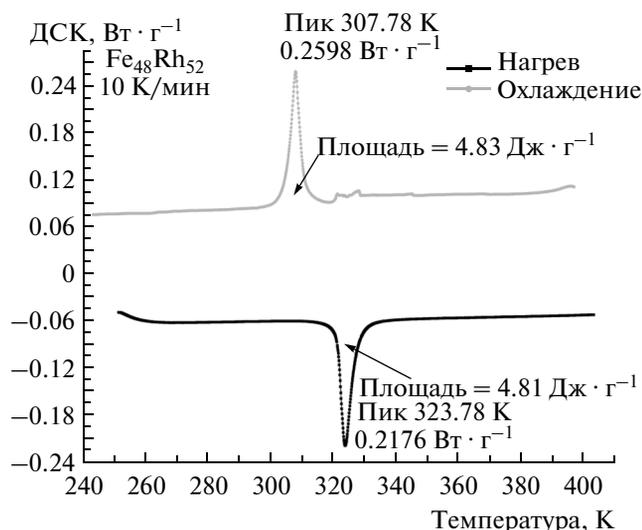


Рис. 2. Эксперименты по ДСК образца сплава $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$ в отсутствие магнитного поля. Скорость нагрева/охлаждения $10 \text{ K} \cdot \text{мин}^{-1}$.

намагниченности (рис. 1) образца $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$ при температурах от 290 К до 314 К. По этим кривым можно сказать, что в образце существуют две фазы, причем одна из них — ферромагнитная в исследованной области температур, а вторая — слабомагнитная и имеет магнитоиндуцированный ФП 1-го рода.

Характерные температуры метамангнитоструктурного ФП исследуемого сплава изначально определялись при помощи коммерческого калориметра Netzsch в нулевом магнитном поле. Скорость прохода $10 \text{ K} \cdot \text{мин}^{-1}$. Температуры начала и конца прямого перехода: $M_s = 312.6 \text{ K}$, $M_f = 305.7 \text{ K}$

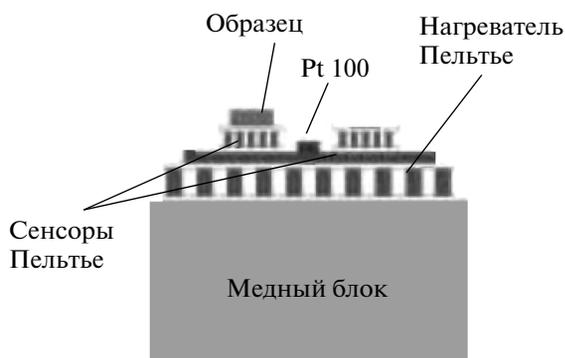


Рис. 3. Схематическое изображение экспериментальной установки для ДСК-материалов в магнитном поле биттеровского магнита (до 140 кЭ).

и обратного: $A_s = 322.1 \text{ K}$, $A_f = 329.4 \text{ K}$ (рис. 2). По площади под пиками ДСК определялась скрытая теплота ФП, что позволило в дальнейшем отградуировать оригинальный дифференциальный калориметр для работы в сильном магнитном поле, созданный на основе элементов Пельтье.

Для создания оригинальной ДСК в магнитном поле применялась методика, использованная в [8]: элемент Пельтье может быть использован как измеритель теплового потока, причем с высокой чувствительностью. В нашей установке использованы два элемента Пельтье на медной подложке, подключенные по дифференциальной схеме. На поверхность одного из элементов приклеивался образец исследуемого сплава $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$. Температуру подложки регулировали при помощи температурного контроллера Lake Shore, подсоединенного к нагревательному элементу Пельтье и платиновому терморезистору Pt 100 (рис. 3). Медный блок находился в хорошем тепловом контакте со стенками вакуумной камеры, в которую помещался калориметр. Описанная установка размещалась в поле биттеровского магнита до 140 кЭ.

На рис. 4 представлены результаты по ДСК сплава $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$ в полях до 40 кЭ. Скорость прохода по температуре $10 \text{ K} \cdot \text{мин}^{-1}$. На графиках хорошо видны неравномерность сдвига температур ФП в поле и уширение пиков ДСК. По площади под пиками подсчитана скрытая теплота ФП в разных магнитных полях, сводные данные пред-

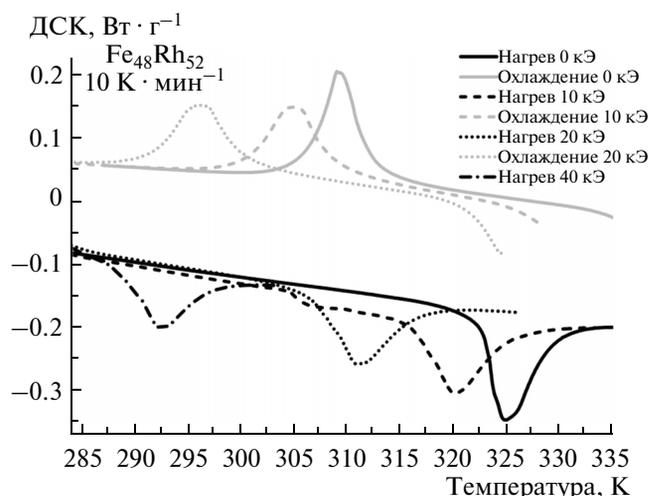


Рис. 4. Эксперименты по ДСК образца сплава $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$ в магнитных полях 0–40 кЭ. Скорость нагрева/охлаждения $10 \text{ K} \cdot \text{мин}^{-1}$.

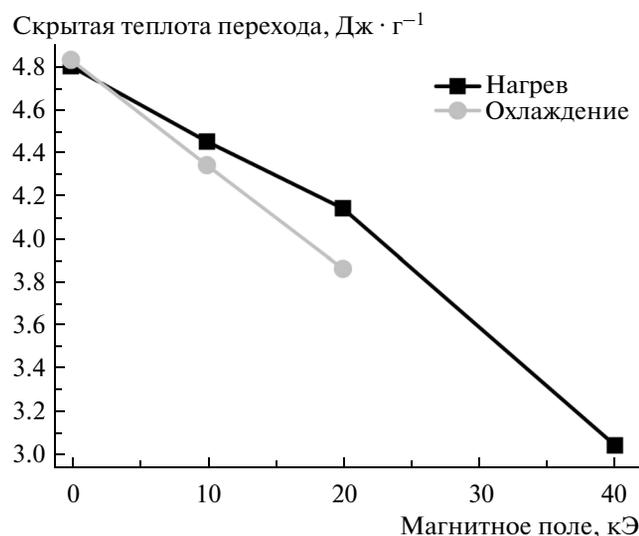


Рис. 5. Зависимость скрытой теплоты ФП от прикладываемого магнитного поля при нагреве и охлаждении в $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$.

ставлены на рис. 5. Показано, что с ростом магнитного поля от 0 до 20 кЭ скрытая теплота прямого ФП снижается с 4.83 до 3.86 Дж · г⁻¹, а скрытая теплота обратного ФП – с 4.81 до 3.04 Дж · г⁻¹ с ростом магнитного поля от 0 до 40 кЭ, что качественно согласуется с результатами, полученными в [4].

В дополнение исследовалась скрытая теплота ФП, индуцированного магнитным полем при постоянной температуре $T = 280$ К. Скорость приложения магнитного поля составляла 120 кЭ · мин⁻¹. Результаты проходов для полей 120 и 140 кЭ представлены на рис. 6. Данная методика позволяет определить минимальную величину магнитного поля, необходимого, чтобы вызвать полное ФП при постоянной температуре. В данных условиях для $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$ это поле равно 120 кЭ.

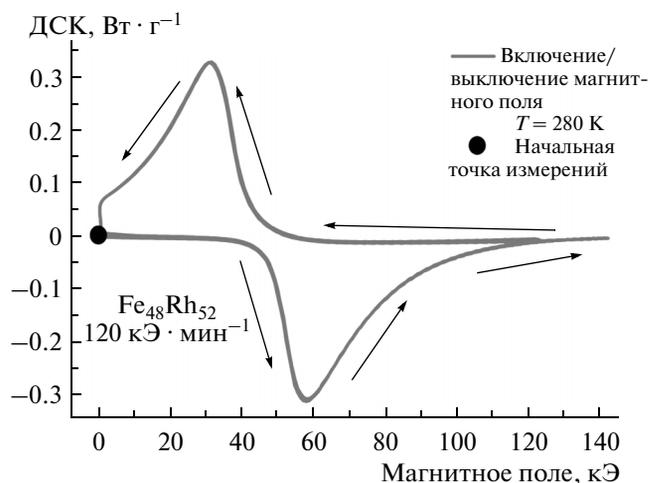


Рис. 6. Исследование скрытой теплоты ФП при включении/выключении магнитного поля со скоростью 120 кЭ · мин⁻¹ при постоянной температуре 280 К в образце сплава $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 13-03-00744, 14-02-93968.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Annaorazov M.P., Asatryan K.A., Myalikgulyev G. et al. // Cryogenics. 1992. V. 32. P. 867.
2. Kouvel J.C., Hartelius C.C. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. P. 1343.
3. Annaorazov M.P., Nikitin S.A., Tyurin A.L. et al. // J. Appl. Phys. 1996. V. 79. P. 1689.
4. Stern-Taulats E., Planes A., Lloveras P. et al. // Phys. Rev. B. 2014. V. 89. P. 214105.
5. Thiele J.-U., Maat S., Fullerton E.E. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 2859.
6. Marti X., Fina I., Frontera C. et al. // Nature Mater. 2014. V. 13. P. 367.
7. Zakharov A.I., Kadomtseva A.M., Levitin R.Z., Ponyatovskii E.G. // Sov. Phys. JETP. 1964. V. 19. P. 1348.
8. Plackowski T., Wang Y., Junod A. // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73. P. 2755.