

05,01

## Высокополевая намагниченность сплавов Гейслера $Fe_2XY$ ( $X = Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni$ ; $Y = Al, Si$ )

© Н.И. Коуров<sup>1</sup>, В.В. Марченков<sup>1,2</sup>, А.В. Королев<sup>1</sup>, К.А. Белозерова<sup>1</sup>, Н.В. Weber<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет,  
Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Atominstitut, Vienna University of Technology,  
Vienna, Austria

E-mail: kourov@imp.uran.ru

(Поступила в Редакцию 22 апреля 2015 г.)

При  $T = 4.2$  К в интервале  $H \leq 70$  кОе проведены измерения кривых намагничивания ферромагнитных сплавов Гейслера  $Fe_2XY$ , где  $X = Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni$  — переходные 3d-элементы;  $Y = Al, Si$  — s-, p-элементы третьего периода Периодической таблицы элементов. Показано, что высокополевая ( $H \geq 20$  кОе) намагниченность описывается в модели Стонера.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме „Спин“ № 01201463330 (проект № 15-17-2-12) при частичной поддержке РФФИ (гранты № 12-02-00271 и № 15-02-06686) и научной школы НШ-1540.2014.2.

**1.** Расчеты электронной зонной структуры сплавов Гейслера  $Fe_2XY$  (где  $X = Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni$  — переходные 3d-элементы;  $Y = Al, Si$  — s-, p-элементы третьего периода Периодической таблицы элементов) [1–7], а также результаты исследований оптических [1–3], магнитных [1,8–12] и электрических [13] свойств показывают, что эти сплавы можно рассматривать в качестве зонных ферромагнетиков. В случае атомного упорядочения в структуре  $L2_1$  большинство из этих сплавов относят к классу полуметаллических ферромагнетиков. В их электронном спектре на уровне Ферми  $E_F$  реализуется энергетическая щель в одной из подполос, отличающихся направлением спинов электронов. Следовательно, эти сплавы можно рассматривать в качестве „сильных“ зонных ферромагнетиков с большим значением спинового расщепления, которые должны подчиняться „классической“ модели Стонера [14]. В то же время, согласно зонным расчетам [4], в сплаве  $Fe_2VAl$  энергетическая щель на  $E_F$  шириной  $\sim 1$  eV образуется в обеих подзонах, а в сплаве  $Fe_3Al$  энергетическая щель на  $E_F$  практически отсутствует [6].

Согласно ранее проведенным исследованиям магнитных свойств [1,8–12], эти сплавы являются ферромагнетиками с сильно отличающимися друг от друга значениями температур Кюри  $T_C$ . Их намагниченность  $M(H)$  в магнитоупорядоченном состоянии также изменяется на порядки величины. Общий ход полевых зависимостей намагниченности этих сплавов, казалось бы, имеет вид, обычный для металлических ферромагнетиков. Однако представляет интерес проведение более детального анализа полевых зависимостей намагниченности сплавов вблизи основного состояния (при  $T \ll T_C$ ) с учетом зонной природы их магнитного упорядочения. С этой

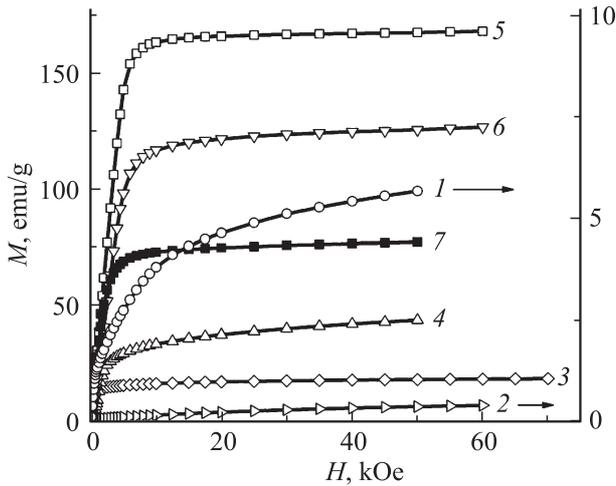
целью мы провели исследования кривых  $M(H)$  рассматриваемых сплавов в интервале  $H \leq 70$  кОе при  $T = 4.2$  К.

**2.** Способ получения образцов сплавов  $Fe_2XY$  (где  $X = Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni$ ;  $Y = Al, Si$ ) описан в [13]. Атомное содержание элементов в сплавах контролировалось с помощью сканирующего электронного микроскопа FEI Company Quanta 200, оснащенного приставкой рентгеновского микроанализа EDAX. Исследования показали, что для всех изученных сплавов отклонения от стехиометрического состава являются незначительными. Согласно рентгеноструктурным исследованиям, выполненным в центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН, все сплавы упорядочены в структуре  $L2_1$ .

Измерения полевых зависимостей намагниченности  $M(H)$  проводились в Атомном институте Венского технологического университета (Австрия) и в отделе магнитных измерений ИФМ УрО РАН на установках SQUID magnetometer MPMS XL7 (Quantum Design).

**3.** Результаты измерений кривых намагничивания сплавов Гейслера  $Fe_2XY$  (где  $X = Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni$ ;  $Y = Al, Si$ ) при  $T = 4.2$  К приведены на рис. 1. Как видно, их намагниченность при температуре жидкого гелия  $T = 4.2$  К изменяется от  $M \sim 0.4$  emu/g в сплаве  $Fe_2VAl$  до  $M \sim 170$  emu/g в сплаве  $Fe_3Al$ . При этом возрастание числа валентных электронов  $Z$ , приходящихся на формульную единицу, в зонных ферромагнетиках  $Fe_2XY$  сопровождается резким увеличением намагниченности при  $Z \geq 25$ .

Из экспериментальных данных, приведенных на рис. 1 следует, что в сильных магнитных полях (при  $H \geq 20$  кОе) зависимости  $M(H)$  всех исследованных



**Рис. 1.** Кривые намагничивания магнитных сплавов Гейслера  $Fe_2XY$ . Светлые значки соответствуют экспериментальным значениям  $M(H)$  для сплавов  $Fe_2MeAl$ : 1 —  $Me = Ti$ , 2 —  $V$ , 3 —  $Cr$ , 4 —  $Mn$ , 5 —  $Fe$ , 6 —  $Ni$ , темные (кривая 7) — для сплава  $Fe_2MnSi$ . Стрелками показаны оси координат.

сплавов не выходят в насыщение, что должно наблюдаться в классических (типа гадолиния) локализованных ферромагнетиках [15]. В этой области магнитных полей заканчивается процесс технического намагничивания и образцы находятся практически в однодоменном состоянии.

Отсутствие „эффекта насыщения“ кривых намагничивания в поликристаллических локализованных ферромагнетиках обычно связывают с конкуренцией вращательных сил для магнитных моментов, создаваемых магнитным полем и кристаллографической анизотропией [15]. Асимптотическое поведение намагниченности таких ферромагнетиков, как правило, описывают в приближении Акулова [16] выражением

$$M(H) = M_0 - \frac{DK^2}{M_0^2} H^{-2}. \quad (1)$$

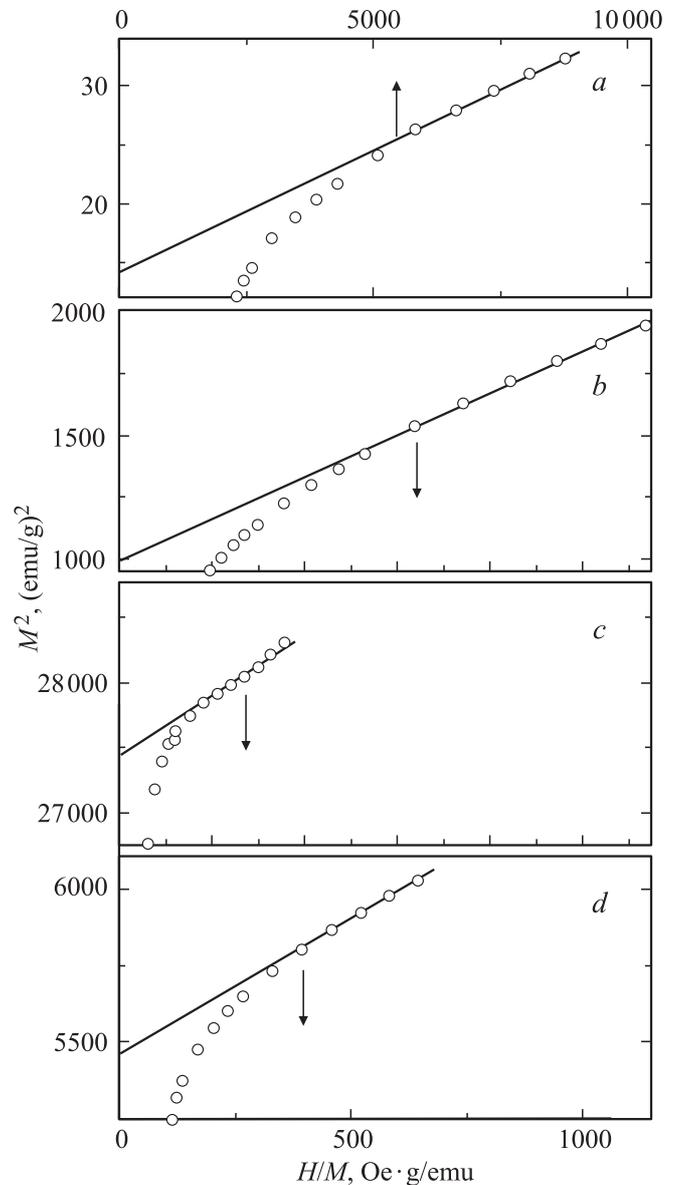
В формуле (1)  $M_0$  — намагниченность насыщения,  $K$  — константа магнитокристаллической анизотропии,  $D = 0.0762$  — коэффициент, вычисленный для поликристаллических образцов кубической сингонии [17]. Однако использование выражения (1) не дает удовлетворительного описания полученных результатов измерения кривых  $M(H)$  в пределе сильных магнитных полей, применяемых в данной работе.

В случае зонной природы магнетизма намагниченность исследованных сплавов должна определяться в основном перестройкой электронной зонной структуры в магнитном поле. Отсутствие эффекта насыщения кривых  $M(H)$  в предельно больших магнитных полях является характерной чертой зонных ферромагнетиков. Исходя из модели Стонера [14], высокополевая намагниченность в рассматриваемых сплавах Гейслера должна

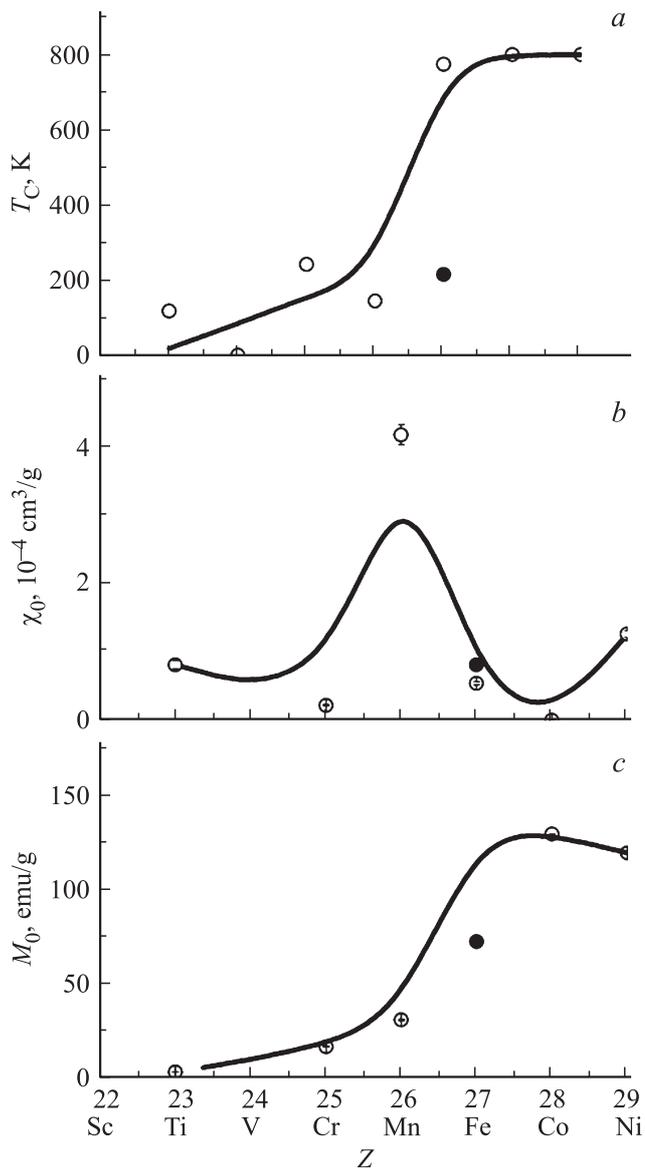
описываться соотношением

$$M^2 = A + B \cdot H/M, \quad (2)$$

где константы  $A = M_0^2(1 - T/T_C)^2$ , а  $B = 2\chi_0 M_0^2$ . На рис. 2 для примера приведены зависимости  $M^2$  от  $H/M$  для некоторых исследованных сплавов  $Fe_2XY$ . Видно, что соотношение (2) действительно выполняется при  $H \geq 20$  kOe для всех этих зонных ферромагнетиков, значительно отличающихся друг от друга величиной намагниченности, значениями точек Кюри и характером электронной зонной структуры. Исключением является только слабо магнитный сплав  $Fe_2VAl$ , у которого в атомноупорядоченном  $L2_1$ -состоянии на  $E_F$  практически отсутствуют валентные электроны [4].



**Рис. 2.** Зависимости  $M^2$  от  $H/M$  для ферромагнитных сплавов Гейслера  $Fe_2MeAl$ :  $a$  —  $Me = Ti$ ,  $b$  —  $Mn$ ,  $c$  —  $Fe$ ,  $d$  —  $Fe_2MnSi$ . Стрелки показывают оси координат.



**Рис. 3.** Магнитные параметры (*b* — магнитная восприимчивость, *c* — намагниченность насыщения) в зависимости от числа валентных электронов  $Z$ , определенные согласно выражению (2) в зонных ферромагнетиках  $Fe_2XY$ . Значения  $\circ$  — получены для сплавов  $Fe_2MeAl$  (где  $Me = Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni$ ),  $\bullet$  — для сплава  $Fe_2MnSi$ . Температуры Кюри (*a*) определены в [1,8–12].

Учитывая значения  $T_C$ , определенные для исследованных сплавов в [1,8–12] и приведенные на рис. 3, в результате обработки экспериментальных данных  $M(H)$  при  $H \geq 20$  кОе согласно выражению (2), мы вычислили значения величин намагниченности насыщения  $M_0$  и магнитной восприимчивости  $\chi_0$ , которые также даны на рис. 3. Видно, что в зависимости от числа валентных электронов  $Z$  изменения величин  $M_0$  и  $T_C$  коррелируют между собой, что следует ожидать согласно модели Стонера в пределе малой намагниченности [14]. Некоторое отличие в поведении зависимостей  $M_0(Z)$

и  $T_C(Z)$  при  $Z > 26$ , по-видимому, обусловлено тем, что точки Кюри этих сплавов практически совпадают с температурой образования упорядоченной  $L2_1$ -структуры  $T_0 \sim 800$  К. Величины магнитной восприимчивости имеют значения, разумные для 3d-ферромагнетиков  $\chi_0 \sim (10^{-5} - 10^{-4})$  см<sup>3</sup>/г.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что в пределе сильных магнитных полей ( $H \geq 20$  кОе) намагниченность сплавов Гейслера  $Fe_2XY$  (где  $X = Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni$ ;  $Y = Al, Si$ ), несмотря на значительное различие их величин намагниченности, температур Кюри и характера электронной зонной структуры, описывается в рамках приближения Стонера [14]. Это, в свою очередь, подтверждает зонную природу магнетизма исследованных сплавов.

### Список литературы

- [1] E. Shreder, S.V. Streltsov, A. Svyazhin, A. Makhnev, V.V. Marchenkov, A. Lukoyanov, H.W. Weber. Evolution of the electronic structure and physical properties of  $Fe_2MeAl$  ( $Me = Ti, V, Cr$ ) Heusler alloys. *J. Phys.: Condens. Matter* **20**, 045 212 (2008).
- [2] Е.И. Шредер, А.Д. Свяжин, К.А. Фомина. *ФММ* **113**, 155 (2012).
- [3] K.A. Fomina, V.V. Marchenkov, E.I. Shreder, H.W. Weber. *Solid State Phenomena*. **168–169**, 545 (2011).
- [4] B. Xu, J. Liu, L. Yi. *Phys. Lett. A* **363**, 312 (2007).
- [5] V. Sharma, G. Pilania. *JMMM* **339**, 142 (2013).
- [6] A. Bansil, S. Kaprzyk, P.E. Mijnders, J. Tobota. *Phys. Rev. B* **60**, 13 396 (1999).
- [7] S. Fujii, S. Ishida, S. Asano. *J. Phys. Soc. Jpn.* **64**, 185 (1995).
- [8] R.Y. Umetsu, N. Morimoto, M. Nagasako, R. Kainuma, T. Kanomata. *J. Alloys and Compounds*. **528**, 3219 (2011).
- [9] Zhuhong Liu, Xingqiao Ma, Fanbin Meng, Guangheng Wu. *J. Alloys and Compounds*. **509**, 34 (2012).
- [10] K.H.J. Buschow, P.G. Engen. *JMMM* **25**, 90 (1981).
- [11] М. Хансен, К. Андерко. Структура двойных сплавов. Металлургия, Москва. Т. 1. (1986). 608 с.
- [12] T. Sakon, K. Koyama, O. Kamiya, S. Awaji, S. Nakamura, T. Nojima, K. Watanabe, M. Hiroi. *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 044 802 (2013).
- [13] Н.И. Коуров, В.В. Марченков, К.А. Белозерова, Х.В. Вебер. *ЖЭТФ* **145**, 491 (2014).
- [14] E.S. Stoner. *Proc. Roy. Soc. A* **165**, 372 (1938); **A 169**, 339 (1939).
- [15] С.В. Вонсовский, Магнетизм. Наука, Москва (1971).
- [16] N.S. Akulov. *Zs. Phys.* **69**, 278 (1931).
- [17] С. Тикадзуми. Физика магнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. Мир, М. (1987). 419 с.