

05,01

Высокополевая намагниченность зонных ферромагнетиков Co_2YAl ($Y = \text{Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni}$)

© Н.И. Коуров¹, В.В. Марченков^{1–3}, Ю.А. Перевозчикова¹, А.В. Королев¹, Н.В. Вебер⁴

¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

³ International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures, Wrocław, Poland

⁴ Atominstitut, Vienna University of Technology, Vienna, Austria

E-mail: kourov@imp.uran.ru

(Поступила в Редакцию 27 апреля 2016 г.)

Проведены исследования полевых зависимостей намагничивания при $T = 4.2\text{ K}$ и $H < 70\text{ kOe}$, а также температурных зависимостей намагниченности при $H = 50\text{ kOe}$ в интервале ($2 < T < 1100$) К ферромагнитных сплавов Гейслера Co_2YAl , где $Y = \text{Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni}$. Показано, что высокополевая ($H \geq 20\text{ kOe}$) намагниченность описывается в модели Стонера.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема „Спин“, № 01201463330) при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-17-2-12), РФФИ (проект № 15-02-06686), научной школы НШ-1540.2014.2 и Правительства Российской Федерации (контракт № 02.A03.21.0006).

1. Введение

Результаты исследований оптических [1], магнитных [2–9] и электрических [6–11] свойств показывают, что сплавы Гейслера Co_2YAl (где Y — переходные $3d$ -элементы) являются зонными ферромагнетиками. Из многочисленных расчетов электронной зонной структуры этих сплавов следует [1,3,4,8,11–15], что в случае атомного упорядочения в структуре $L2_1$ все эти сплавы, за исключением Co_3Al [3], относятся к классу полуметаллических ферромагнетиков. В их электронном спектре на уровне Ферми E_F реализуется энергетическая щель шириной $\Delta E \sim 1\text{ eV}$ в одной из подполос, отличающихся направлением спинов электронов. Следовательно, эти сплавы можно рассматривать в качестве „сильных“ зонных ферромагнетиков с большим значением спинового расщепления, подчиняющимся „классической“ модели Стонера [16].

Согласно ранее проведенным исследованиям магнитных свойств [2–9], рассматриваемые сплавы являются ферромагнетиками с сильно отличающимися друг от друга значениями температур Кюри T_C . Их намагниченность $M(H, T)$ в зависимости от числа валентных электронов в сплаве $z = n_s + n_d$,¹ приходящихся на формульную единицу, также изменяется на порядки величины. Однако представляет интерес проведение более детального анализа полевых и температурных зависимостей намагниченности сплавов с учетом зонной природы их магнетизма. С этой целью мы провели исследования кривых $M(H)$ сплавов Co_2YAl ($Y = \text{Ti, V,$

Cr, Mn, Fe, Ni) в интервале $H \leq 70\text{ kOe}$ при $T = 4.2\text{ K}$ и температурных зависимостей намагниченности $M(T)$ в сильных магнитных полях $H = 50\text{ kOe}$ при $T < T_C$.

2. Образцы и методика эксперимента

Исследованные сплавы Co_2YAl ($Y = \text{Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni}$) были выплавлены в индукционной печи в атмосфере очищенного аргона. Слитки переплавляли несколько раз, чтобы обеспечить равномерное перемешивание компонентов. Полученные образцы отжигали в течение 48 h при 800 K в атмосфере аргона с последующим охлаждением до комнатной температуры со скоростью около 100 K/h.

Атомное содержание элементов в сплавах контролировалось с помощью сканирующего электронного микроскопа FEI Company Quanta 200, оснащенного приставкой рентгеновского микроанализа EDAX. Проведенные исследования показали, что для всех изученных сплавов отклонения от стехиометрического состава являются незначительными. Согласно рентгеноструктурным исследованиям, практически все полученные сплавы имели однофазное упорядочение в структуре $L2_1$. Исключение составлял сплав Co_2NiAl , в котором наблюдались некоторые отклонения от стехиометрического состава и присутствие зародышей $B2$ -фазы. Структурная аттестация исследованных сплавов была выполнена в центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН.

Измерения полевых и температурных зависимостей намагниченности $M(H, T)$ проводились в Атоминституте Венского технологического университета (Австрия)

¹ Здесь n_s и n_d , суммарное число s - и d -электронов соответственно.

и в отделе магнитных измерений ИФМ УрО РАН на установках SQUID magnetometer MPMS XL7 (Quantum Design). Часть исследований выполнена в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (Польша).

3. Результаты измерений и их обсуждение

Результаты измерений кривых намагничивания при $T = 4.2 \text{ K}$ и температурные зависимости намагниченности при $H = 50 \text{ kOe}$ в зонных ферромагнетиках Co_2YAl ($Y = \text{Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni}$) приведены на рис. 1. Как видно, полевые зависимости намагниченности $M(H)$ всех образцов при $H \geq 20 \text{ kOe}$ приближаются к насыщению. В этой области магнитных полей практически заканчивается процесс технического намагничивания и образцы находятся в однодоменном состоянии. В случае зонной природы магнетизма рассматриваемых сплавов намагниченность здесь будет определяться в основном перестройкой электронной зонной структуры в магнитном поле. Исходя из модели Стонера [16], высокополевая намагниченность в рассматриваемых зонных ферромагнетиках должна описываться соотношением

$$M^2 = M_S^2 + 2\chi_0 M_0^2 H/M, \quad (1)$$

где M_S — спонтанная намагниченность, M_0 — намагниченность насыщения, χ_0 — восприимчивость парапро-

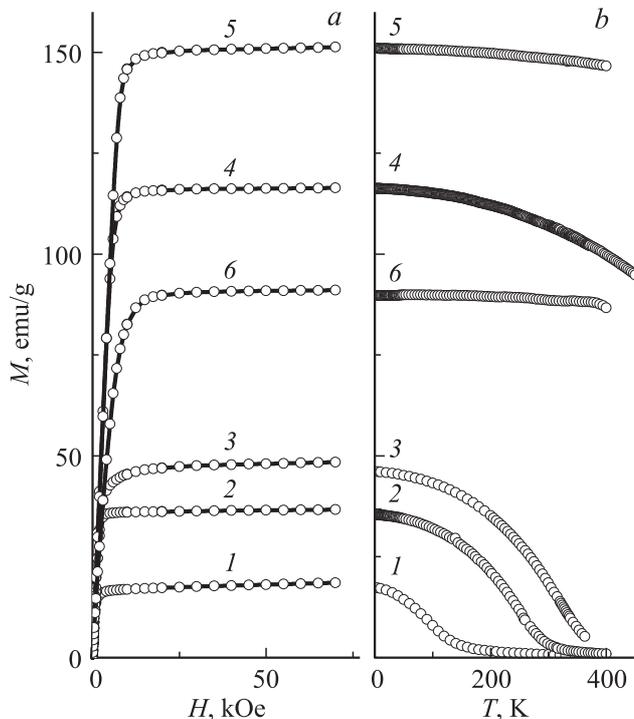


Рис. 1. *a* — кривые намагничивания при $T = 4.2 \text{ K}$, *b* — температурные зависимости намагниченности при $H = 50 \text{ kOe}$ в сплавах Гейслера Co_2YAl : 1 — $Y = \text{Ti}$, 2 — V , 3 — Cr , 4 — Mn , 5 — Fe , 6 — Ni .

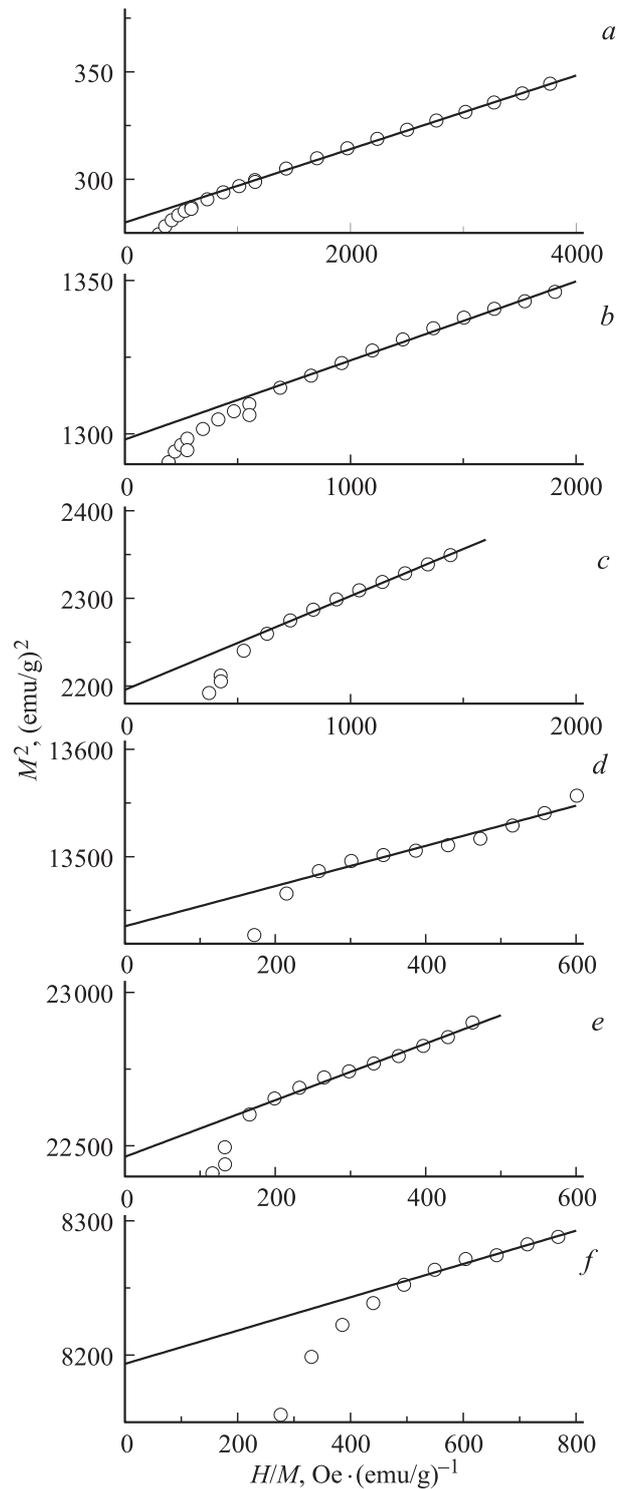


Рис. 2. Зависимости M^2 от H/M , полученные при $T = 4.2 \text{ K}$, для ферромагнитных сплавов Гейслера Co_2YAl : *a* — $Y = \text{Ti}$, *b* — V , *c* — Cr , *d* — Mn , *e* — Fe , *f* — Ni .

цесса. В свою очередь

$$M_S^2 = M_0^2 [1 - (T/T_C)^2]. \quad (2)$$

На рис. 2 приведены зависимости M^2 от H/M для исследованных сплавов Гейслера Co_2YAl . Видно,

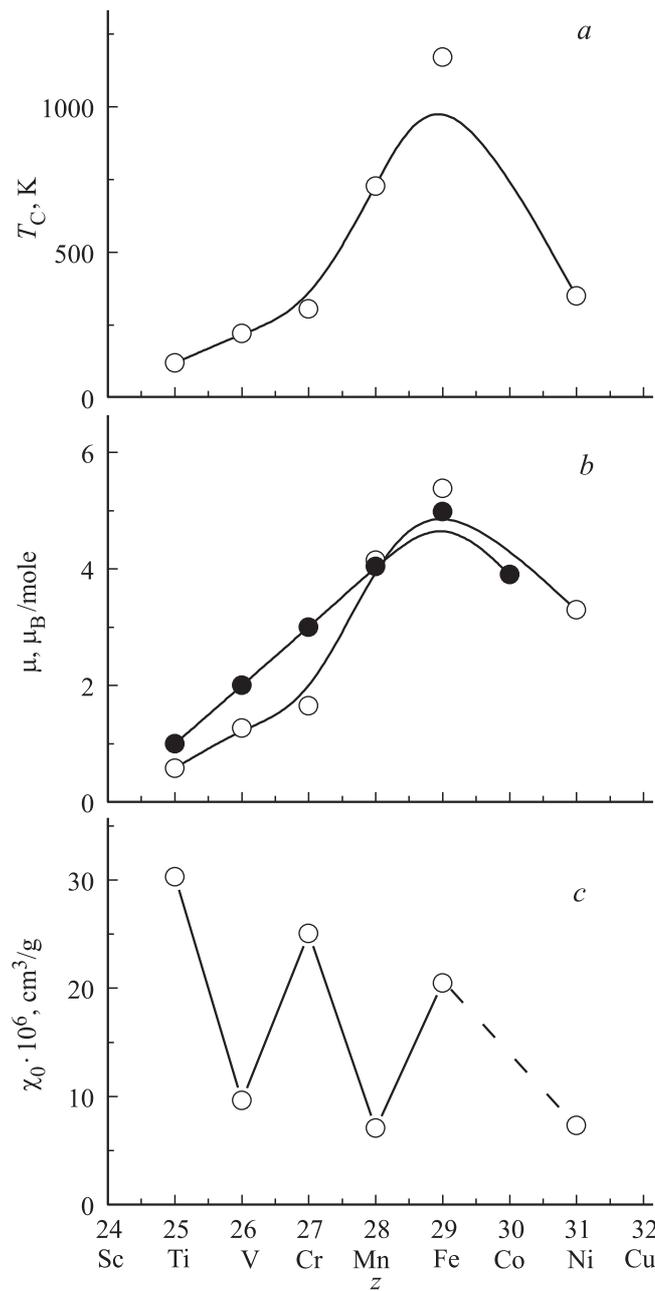


Рис. 3. Магнитные параметры $\mu(\circ)$ — b и $\chi_0(\circ)$ — c в сплавах Гейслера Co_2YAl (где $Y = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ni}$), определенные согласно выражениям (1) и (2), в зависимости от числа валентных электронов z . Значения $\mu_{\text{теор}}(\bullet)$ — b получены в [4], T_C — a [2].

что соотношение (1) действительно выполняется при $H \geq 20 \text{ kOe}$ для всех этих зонных ферромагнетиков, значительно отличающихся друг от друга величиной намагниченности и значениями температур Кюри. Выполнимость „стонеровского“ соотношения (2) для рассматриваемых сплавов Co_2YAl можно проверить, учитывая значения T_C , приведенные в [2–9] и на рис. 3. Однако из-за сложности определения значений M_S для исследованных сплавов в широкой области температур

мы приводим на рис. 4 зависимости величины намагниченности сплавов M^2 , измеренной при $H = 50 \text{ kOe}$, от $(T/T_C)^2$. Видно, что в области температур $T < T_C$ там, где высокополевая намагниченность $M \approx M_S$, ве-

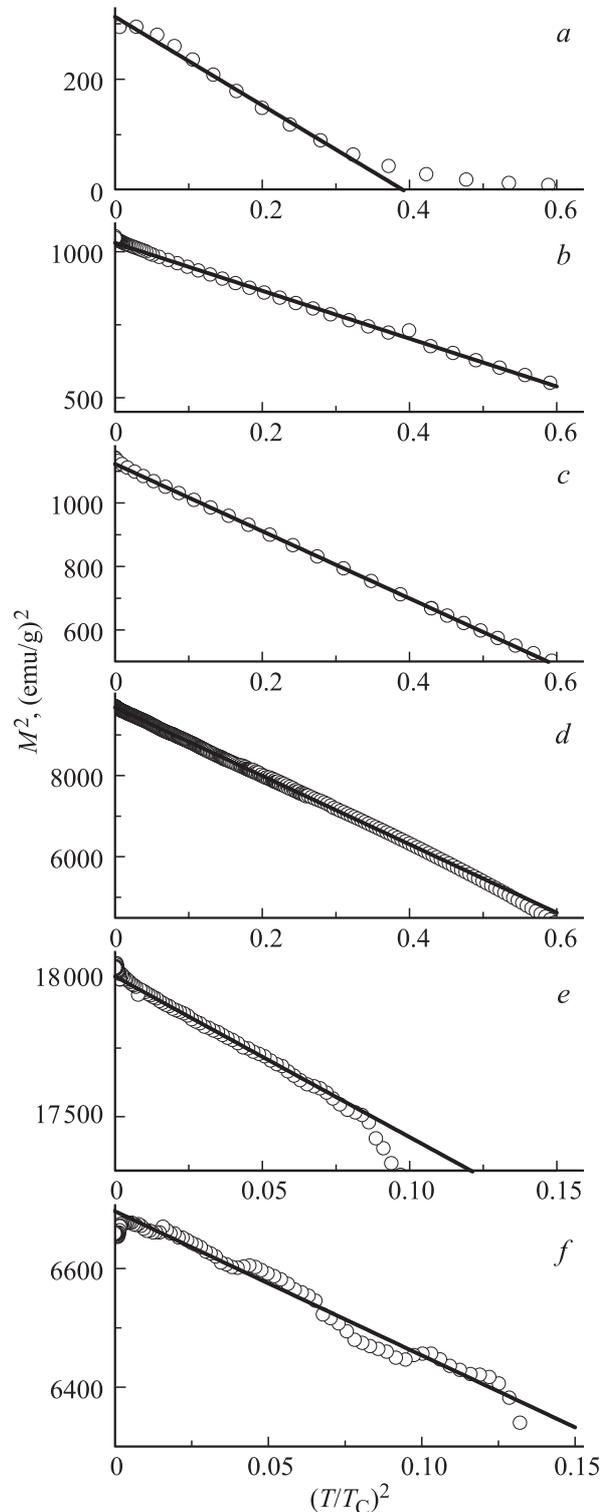


Рис. 4. Зависимости M^2 от $(T/T_C)^2$, определенные при $H = 50 \text{ kOe}$, для ферромагнитных сплавов Гейслера Co_2YAl : $Y = a - \text{Ti}, b - \text{V}, c - \text{Cr}, d - \text{Mn}, e - \text{Fe}, f - \text{Ni}$.

личина M^2 действительно пропорциональна $(T/T_C)^2$, что подтверждает справедливость соотношения (2) для данных зонных ферромагнетиков.

Учитывая определенные для исследованных сплавов и приведенные на рис. 2 и 4 результаты обработки экспериментальных данных намагниченности при $H \geq 20$ кОе согласно выражениям (1) и (2), мы вычислили величины моментов насыщения μ_0 и магнитной восприимчивости χ_0 , которые даются на рис. 3. Там же приводятся теоретические значения моментов $\mu_{теор}$, полученные в результате расчетов электронной зонной структуры сплавов [11–15]. Видно, что значения μ_0 и $\mu_{теор}$ для всех рассматриваемых сплавов близки друг к другу. В зависимости от числа валентных электронов z изменение величины μ_0 в целом коррелирует с поведением $T_C(z)$, что следует ожидать из модели Стонера в пределе малой намагниченности [16]. При прохождении составляющей Y в сплавах Co_2YAl по $3d$ -ряду Периодической таблицы элементов параметры μ_0 и T_C имеют максимальные значения в середине периода. Величина восприимчивости парапроцесса немонотонно понижается с ростом z и составляет $\chi_0 \sim (1-3) \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$. При этом в сплавах с четным числом z на зависимости $\chi_0(z)$ наблюдаются минимумы, а в сплавах с нечетным числом z — максимумы. Следует отметить, что такие же особенности поведения параметров μ_0 , T_C и χ_0 в зависимости от числа валентных электронов имеют место в зонных магнетиках Fe_2YAl [17]. Кроме того, аналогичное поведение $\chi_0(z)$ отмечается для восприимчивости парамагнитных переходных металлов Периодической таблицы элементов и связывается с особенностями их зонной структуры (см., например, [18]).

4. Заключение

Таким образом, проведенные исследования показывают, что в пределе сильных магнитных полей ($H \geq 20$ кОе) намагниченность сплавов Гейслера Co_2YAl (где $Y = Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni$) описывается в рамках приближения Стонера [16]. При этом величины намагниченности насыщения и температуры Кюри имеют максимальные значения в середине $3d$ -периода Периодической таблицы элементов. Восприимчивость парапроцесса немонотонно понижается с ростом z и составляет $\chi_0 \sim (1-3) \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$. Все это подтверждает зонную природу ферромагнетизма исследованных сплавов.

Список литературы

- [1] K.A. Fomina, V.V. Marchenkov, E.I. Shreder, H.W. Weber. *Solid State Phenomena* **168–169**, 545 (2011).
- [2] K.H.J. Buschow, P.G. Engen. *JMMM* **25**, 90 (1981).
- [3] H. Luo, Z. Zhu, L. Ma, S. Xu, G. Wu, H. Liu, J. Qu, Y. Li, X. Zhu, C. Jiang, H. Xu. *JMMM* **320**, 1345 (2008).
- [4] H.C. Kandpal, G.H. Fecher, C. Felser. *J. Phys. D* **40**, 1507 (2007).
- [5] T. Kanomata, Y. Chieda, K. Endo, H. Okada, N. Nagasako, K. Kobayashi, R. Kainuma, R.Y. Umetsu, H. Tagahashi, Y. Furutani, H. Nishihara, K. Abe, Y. Miura, M. Shirai. *Phys. Rev. B* **82**, 144415 (2010).
- [6] R.Y. Umetsu, K. Kobayashi, A. Fujita, R. Kainuma, K. Ishida. *J. Appl. Phys.* **103**, 07D718 (2008).
- [7] Н.И. Коуров, А.В. Королёв, В.В. Марченков, А.В. Лукоянов, К.А. Белозерова. *ФТТ* **55**, 899 (2013).
- [8] V.V. Marchenkov, N.I. Kourov, K.A. Belozerova, S.M. Emelyanova, V.P. Dyakina, E.V. Marchenkova, M. Eisterer, H.W. Weber. *J. Phys. Conf. Ser.* **568**, 052019 (2014).
- [9] T. Graf, G.H. Fecher, J. Barth, J. Winterlik, C. Felser. *J. Phys. D* **42**, 084003 (2009).
- [10] K. Kobayashi, R. Kainuma, K. Ishida. *Mater. Transact.* **47**, 20 (2006).
- [11] Н.И. Коуров, А.В. Лукоянов, В.В. Марченков. *ФТТ* **55**, 2366 (2013).
- [12] Н.И. Коуров, Ю.А. Превозчикова, H.W. Weber, В.В. Марченков. *ФТТ* **58**, 1311 (2016).
- [13] Hongpei Han, Zhengmin Bai, K.L. Yao. *J. Alloys Comp.* **576**, 93 (2013).
- [14] Swetarekha Ram, Mudavath Rahul Chauhan, Kunal Agarwal, V. Kanchana. *Philosoph. Mag. Lett.* **91**, 545 (2011).
- [15] D.P. Rai, Sandeep, A. Shankar, M.P. Chimire, R.K. Thapa. *Phys. Ser.* **86**, 045702 (2012).
- [16] E.S. Stoner. *Proc. Roy. Soc. A* **165**, 372 (1938); *A* **169**, 339 (1939).
- [17] Н.И. Коуров, В.В. Марченков, А.В. Королев, К.А. Белозерова, H.W. Weber. *ФТТ* **57**, 1964 (2015).
- [18] В.Ю. Ирхин, Ю.П. Ирхин. *Электронная структура, физические свойства и корреляционные эффекты d - и f -металлах и их соединениях*. УрО РАН, Екатеринбург (2004). 472 с.