

А. В. ДЕРЯГИН, Ю. Ф. БАШКОВ, А. В. АНДРЕЕВ

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ С НИЗКИМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ИНДУКЦИИ

(Представлено академиком Н. Д. Девятковым 14 VI 1974)

1. В настоящее время все более широкое применение находят постоянные магниты из сплавов легких редкоземельных металлов (р.з.м.) с кобальтом. При этом во многих случаях необходимо обеспечить постоянство или определенную закономерность изменения величины создаваемого ими магнитного поля в некотором интервале температур. Как следует из анализа литературных данных⁽¹⁻³⁾, эта задача может быть решена путем использования в качестве материалов для постоянных магнитов квазибинарных интерметаллических соединений легких (R) и тяжелых (R') р.з.м. с кобальтом вида $R_{1-x}R'_xCo_5$. Действительно, соединения RCo_5 в области температур ниже точки Кюри ($T_C \approx 1000^\circ K$) являются типичными ферромагнетиками с отрицательным температурным коэффициентом обратимых изменений спонтанной намагниченности σ_s , т. е.

$$\alpha_s = \frac{1}{\sigma_s} \frac{d\sigma_s}{dT} < 0,$$

в то время как для $R'Co_5$ в области низких температур (но не ниже температуры компенсации магнитных моментов подрешеток) $\alpha_s > 0$ и в области высоких $\alpha_s < 0$.

Следовательно, для квазибинарных твердых растворов $R_{1-x}R'_xCo_5$ по мере замещения одного р.з.м. другим можно ожидать изменения α_s в относительно широких пределах. Однако соединения $R'Co_5$ имеют более низкие значения σ_s и H_a и к тому же некоторые из них при комнатной температуре обладают магнитной анизотропией типа «легкая плоскость» или «конус легких осей». Поэтому указанная выше замена может привести к нежелательному, с точки зрения получения постоянных магнитов, сильному снижению σ_s и поля магнитноодноосной анизотропии H_a квазибинарных соединений.

В данной работе исследованы концентрационные зависимости σ_s , H_a , теоретического предела $(BH)_{mi} = (4\pi\sigma_s d)^2/4$ (d — рентгеновская плотность), величины α_s *, а также температурная зависимость σ_s для ряда квазибинарных интерметаллических соединений $Sm_{1-x}R'_xCo_5$ ($R = Gd, Tb, Dy, Er$). На основании этих данных определены оптимальные составы сплавов, из которых получены постоянные магниты с очень низким температурным коэффициентом намагниченности (индукции).

2. Сплавы были выплавлены в индукционной печи в атмосфере гелия. Для получения однофазных слитков при пихтовке учитывалось изменение стехиометрического соотношения при переходе от $SmCo_5$ к $TbCo_{5,1}$, $DyCo_{5,3}$ и $ErCo_5$. По металлографическим и рентгеновским данным содержание

* Экспериментально температурный коэффициент определялся из выражения

$$\alpha_s = \frac{\sigma_{T_2} - \sigma_{T_1}}{\sigma_{T_1}(T_2 - T_1)} \cdot 100, \quad T_2 > T_1.$$

других фаз не превышало 2% в системах с Gd, Tb и Dy при $0 \leq x \leq 1$ и 5% в системе с Er при $x \leq 0,5$. Их содержание в сплавах с Er для $x > 0,5$ было существенно больше, поэтому они в работе не обсуждаются.

Исследование концентрационной и температурной зависимости магнитных характеристик проводилось с помощью вибрационного магнитометра в полях до 27 кэ на монокристаллических образцах в виде сферы диаметром 2 мм, полученных из крупнозернистых слитков. Угол разориентации блоков в монокристаллах не превышал 4° . Поле анизотропии определялось из кривых намагничивания, измеренных в легком и трудном направлениях.

3. На рис. 1 представлены концентрационные зависимости σ_s , H_a и $(BH)_{mt}$, измеренные при 20°C . Удельная намагниченность σ_s , так же как и $(BH)_{mt}$, для всех систем сплавов уменьшается при увеличении x . Отклонение от линейности при $x \geq 0,8$ для соединений с Tb и Dy связано с изменением характера магнитной анизотропии в этих сплавах (ось — конус — плоскость). Наибольшие значения магнитных характеристик при одинаковых x наблюдаются для сплавов с Er, наименьшие — с Gd. Оказалось также, что поле магнитноодносной анизотропии соединений при замене Sm на Tb, Dy и Er при малых x уменьшается незначительно и имеет достаточно высокие значения, а для сплавов с Gd оно практически не изменяется*.

На рис. 2 приведена температурная зависимость σ_s при различных x . Легко видеть, что, меняя значения x , можно получить материал для постоянных магнитов с различным сочетанием величин σ_s , $(BH)_{mt}$ и α_s .

Кроме того, комбинируя в соединении два или более различных р.э.м., можно получить материалы, у которых $\alpha_s \sim 0$ в различных интервалах температур. Так, например, для соединений с Gd при $x = 0,45$ с точностью до ошибки измерения ($\sim 1\%$) σ_s не изменяется в области температур от -196 до $+200^\circ\text{C}$, т. е. $\alpha_s < 0,005\%$ /град. В системах с Tb, Dy, Er в том же интервале α_s меняет знак и по абсолютному значению выше. Однако для этих сплавов выше и значение σ_s , и теоретический предел $(BH)_{mt}$. В частности, для сплавов с Er при $x = 0,25$ (минимум α_s) они составляют $89 \text{ гс} \cdot \text{см}^3/\text{г}$ и $23 \text{ Мгс} \cdot \text{э}$ соответственно. Такие высокие потенциальные возможности исследованных соединений дают хорошие предпосылки для получения из них постоянных магнитов с высокой магнитной энергией и хорошей температурной стабильностью их магнитных характеристик.

* Точки на графике $H_a(x)$ являются осредненными значениями из измерений нескольких монокристаллов.

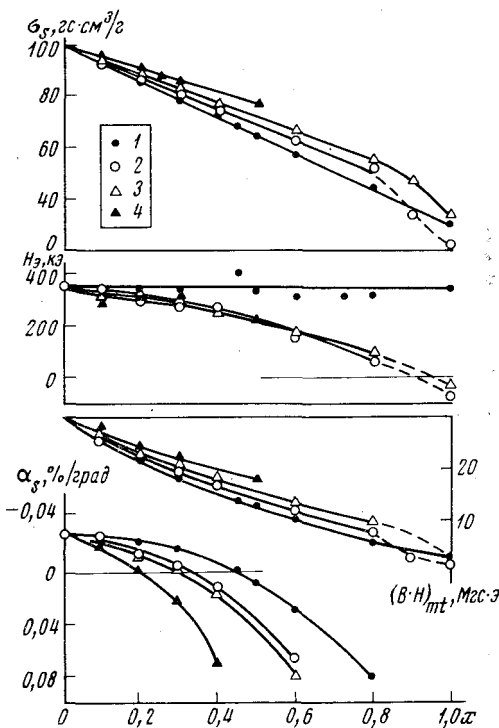


Рис. 1. Концентрационные зависимости намагниченности насыщения σ_s , поля анизотропии H_a , теоретического предела энергетического произведения $(BH)_{mt}$, температурного коэффициента намагниченности α_s монокристаллов соединений $\text{Sm}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Co}_5$ (1), $\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Co}_5$ (2), $\text{Sm}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Co}_5$ (3), $\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x\text{Co}_5$ (4)

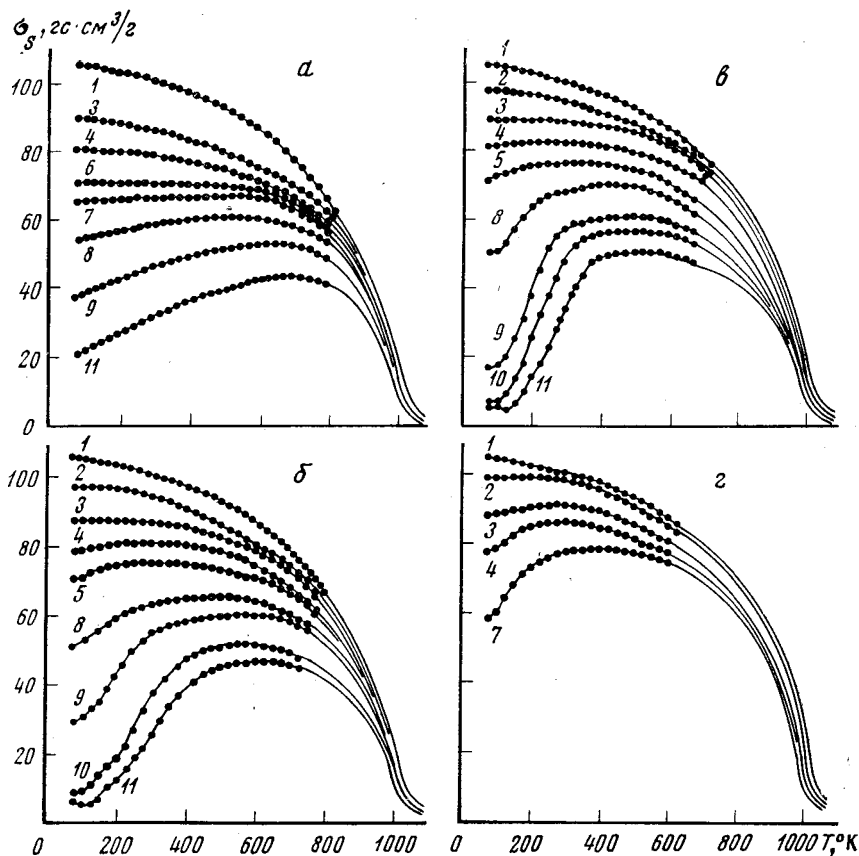


Рис. 2. Температурная зависимость намагниченности насыщения монокристаллов соединений $\text{Sm}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Co}_5$ (а), $\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Co}_5$ (б), $\text{Sm}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Co}_5$ (в), $\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x\text{Co}_5$ (г) для различных значений x : 1 - 0; 2 - 0,1; 3 - 0,2; 4 - 0,3; 5 - 0,4; 6 - 0,45; 7 - 0,5; 8 - 0,6; 9 - 0,8; 10 - 0,9; 11 - 1

4. Постоянные магниты были изготовлены из сплавов состава, при котором α_s минимален. Измельчение порошка сплава совместно с добавкой SmCo_2 проводилось в вибромельнице в толуоле. Полученные порошки размером ~ 5 мкм прессовались изостатически при давлении 10 т/см^2 . Спекание образцов осуществлялось при 1120°C в течение 1 часа в гелии высокой чистоты с предельным обезгаживанием их в вакууме 10^{-5} – 10^{-4} мм рт. ст. Охлаждение проводилось со скоростью (4–6) град/мин до 850°C и далее (300–400) град/мин до комнатной температуры.

В табл. 1 приведены магнитные характеристики полученных образцов и средние значения величины α_d для различных интервалов температур. Практически нулевой температурный коэффициент индукции наблюдается для металлокерамических ($BH_m \approx 10$ – $11 \text{ Мгс}\cdot\text{э}$) и для монокристаллических ($14 \text{ Мгс}\cdot\text{э}$) магнитов из сплава с Gd. При использовании соединения $\text{Sm}_{0,75}\text{Er}_{0,25}\text{Co}_5$ удастся получить магниты с $(BH) \approx 16 \text{ Мгс}\cdot\text{э}$, но $\alpha_d \approx 0,013$. Для сравнения следует отметить, что для магнитов, полученных из сплава SmCo_5 , в зависимости от среднего состава спекаемой смеси α_d изменяется в пределах от 0,026 до 0,036 %/град при $(BH)_m \approx 20$ – $22 \text{ Мгс}\cdot\text{э}$.

Таким образом, на основании проведенных в работе исследований показана возможность получения из квазибинарных интерметаллических соединений легких и тяжелых редкоземельных металлов с кобальтом постоян-

Таблица 1

Соединение	B_r , кГс	H_c , кЭ	H'_c , кЭ	$(HB)_{m'}$, Мгс·Э	α_d , %/град			
					от -100 до +20° С	от +20 до +100° С	от +100 до +200° С	от -100 до +200° С
$Sm_{0,55}Gd_{0,45}Co_5$ (монокристалл)	7,5	4,8	4,8	14,0	<0,005	<0,005	—	<0,005 *
$Sm_{0,53}Gd_{0,47}Co_5$	6,5	25,0	6,5	10,6	<0,005	<0,005	-0,012	<0,005
$Sm_{0,7}Tb_{0,3}Co_5$	7,8	9,5	6,6	13,4	<0,005	-0,016	-0,022	-0,014
$Sm_{0,65}Tb_{0,35}Co_5$	7,4	17,2	7,2	13,3	<0,005	-0,011	-0,019	-0,012
$Sm_{0,7}Dy_{0,3}Co_5$	8,0	13,5	7,2	14,8	<0,005	-0,014	-0,022	-0,013
$Sm_{0,65}Dy_{0,35}Co_5$	7,6	20,0	7,4	14,3	<0,005	-0,010	-0,018	-0,011
$Sm_{0,8}Er_{0,2}Co_5$	8,2	23,5	7,6	16,0	-0,007	-0,013	-0,024	-0,014
$SmCo_5$	9,2	25,0	9,2	21,0	-(0,020— -0,030)	-(0,025— -0,035)	-(0,030— -0,045)	-(0,026— -0,036)
$SmCo_5$ (монокристалл)	11,3	9,8	9,8	31,9	-0,020	-0,025	—	-0,026 *

Примечания. α_d измерен в собственном размагничивающем поле магнита (сферы \varnothing 3 мм), равном $\sim 0,25 B_r$; звездочкой отмечены значения α_d , измеренные в области температур от -100 до +120° С.

ных магнитов с высокой магнитной энергией и очень низким температурным коэффициентом обратимых изменений индукции. Из представленных результатов также следует, что, изменяя химический состав соединений, содержащих два или более редкоземельных металла, можно изменять величины магнитных характеристик постоянных магнитов в широких пределах.

Уральский государственный университет
им. А. М. Горького
Свердловск

Поступило
14 VI.1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ E. A. Nesbitt, G. Y. Chin et al., J. Appl. Phys., v. 42, 1530 (1971). ² E. Tatsu-moto, T. Okamoto et al., J. Phys., v. 32, C1-550 (1970). ³ T. Okamoto, H. Fujii et al., J. Phys. Soc. Japan, v. 34, 835 (1973).