

Магнитные свойства магнитотвёрдых сплавов Fe – Cr – 10 масс.% Co*

Т. А. Вомпе, И. М. Миляев, В. С. Юсупов

Изучены магнитные гистерезисные свойства порошковых сплавов системы Fe – Cr – 10 масс.% Co. Получены следующие значения магнитных свойств для сплавов (в масс %): Fe – 28 Cr – 10 Co – 3,7 Mo – 0,5 Si — коэрцитивная сила $H_c = 46,31$ кА/м; Fe – 24,7 Cr – 10 Co – 2 Mo – 0,5 Si — остаточная индукция $B_r = 1,355$ Тл; Fe – 28 Cr – 10 Co – 0,3 Mo – 0,5 Si — максимальная магнитная энергия $(BH)_{\max} = 33$ кДж/м³. Уровень магнитных гистерезисных свойств на порошковых сплавах близок к уровню аналогичных свойств промышленного сплава 25Х15КА (ГОСТ 24897-81).

Ключевые слова: постоянные магниты, порошковые магниты, магнитные свойства, коэрцитивная сила, остаточная индукция.

The magnetic properties of hard-magnetic Fe – Cr – 10 % Co powder alloys have been investigated. The following magnetic properties were found: $H_c = 46,31$ kA/m in Fe – 28 % Cr – 10 % Co – 3,7 % Mo – 0,5 % Si alloy, $B_r = 1,355$ T in Fe – 24,7 % Cr – 10 % Co – 2 % Mo – 0,5 % Si alloy and $(BH)_{\max} = 33$ kJ/m³ in Fe – 28 % Cr – 10 % Co – 0,3 % Mo – 0,5 % Si alloy. The level of the magnetic properties of powder alloys is close to the level of similar properties of the commercial Fe – 25 % Cr – 15 % Co alloy.

Keywords: permanent magnets, powder magnets, magnetic properties, coercive force, residual induction.

Введение

История развития деформируемых магнитотвёрдых сплавов системы Fe – Cr – Co, показывает, что разработка новых марок сплавов этой системы идет по пути постоянного снижения содержания самого дорого компонента — кобальта при сохранении относительно высокого уровня магнитных гистерезисных свойств.

На сплавах системы Fe – Cr – Co с 8 – 12 масс.% кобальта [1 – 3] были получены магнитные гистерезисные свойства на уровне сопоставимом с уровнем аналогичных свойств сплавов ЮНДК24. На Fe – Cr – Co сплаве с 10 масс.% кобальта была получена коэрцитивная сила до 44 кА/м, остаточная индукция до 1,47 Тл и максимальное магнитное произведение 42 кДж/м³ [2], которые не хуже свойств промышленного сплава 25Х15КА (ГОСТ 24897-81) [4].

*Работа отмечена дипломом оргкомитета IV международной конференции с элементами научной школы для молодежи “Функциональные наноматериалы и высококачественные вещества” (г. Суздаль, 1 – 5 октября 2012 г.)

В последнее время появляется все возрастающий интерес к производству постоянных магнитов методами порошковой металлургии, связанных, с одной стороны, с производством магнитов сложной формы, а с другой — с наличием резервных мощностей для производства порошковых магнитов на предприятиях производителях постоянных магнитов.

Цель данной работы — изучение формирования магнитных гистерезисных свойств порошковых сплавов системы Fe – Cr – Co с 10% кобальта.

Методика эксперимента

Для исследования были выбраны магнитотвёрдые порошковые сплавы (далее все в масс.%): Fe – (24,6 – 31,4) Cr – 10 Co – (0,3 – 3,7) Mo – 0,5 Si. Химический состав порошковых образцов приведен в табл. 1. Для приготовления использовали порошки железа (марки ВС), хрома (ПХС-1), кобальта (ПК-1У, ГОСТ 9721-79), молибдена и кремния. Смешивание порошков проводили в турбулентном смесителе С2.0. Компактирование осуществляли путем односто-

Таблица 1

Химический состав исследуемых образцов					
№ серии	Содержание элементов, масс.%				
	Cr	Co	Mo	Si	Fe
1	28,0	10	2,0	0,5	ост.
2	28,0	10	0,3	0,5	ост.
3	31,4	10	2,0	0,5	ост.
4	28,0	10	3,7	0,5	ост.
5	24,7	10	2,0	0,5	ост.

ронного прессования на ручном прессе в разъемной матрице с внутренним диаметром 13,6 мм при давлении 600 МПа. Образцы спекали в вакуумной шахтной печи СШВ-1,25/24-И1 в вакууме 10^{-2} Па при температуре 1420°C 2,5 ч. В силу использования схемы одностороннего прессования разница после спекания в размерах нижнего и верхнего диаметров образца составляла не более 0,2 мм.

Относительную плотность образцов определяли геометрическими методами, рассчитывали плотности после прессования и после спекания.

Термомагнитную обработку образцов проводили в лабораторной печи с панцирным электромагнитом в магнитном поле более 3000 Э, температуру в которой поддерживали и контролировали с помощью программируемого измеритель-регулятора ТРМ251 и хромель-алюмелевой термопары.

Магнитные гистерезисные свойства снимали на гистерезисографе "Ретмаграф L" и УИ.ФИ-400.5-003.

Травление шлифов для выявления микроструктуры выполняли в реактиве, состоящем из соляной кислоты HCl, серной кислоты H₂SO₄, сернокислой меди и воды.

Результаты и их обсуждение

Сырые прессовки изучаемых сплавов имели относительную плотность в пределах 76,7–79,4%, а готовые (после спекания) — 97,9–99,9%.

В процессе изучения магнитных гистерезисных свойств исследуемых сплавов применяли двухступенчатую термомагнитную обработку (ТМО). Схема обработки приведена на рис. 1, где T_q — температура закалки, T_1 — температура выше температуры начала расслоения T_s , T_2 — температура начала ТМО (первая ступень), а v_1 — соответствующая скорость охлаждения, $T_3 = 600^\circ\text{C}$ — температура начала термообработки без магнитного поля (вторая ступень) с быстрой скоростью охлаждения сплава $v_2 = 8^\circ\text{C}/\text{ч}$, а $T_4 = 500^\circ\text{C}$ — конечная температура обработки.

Микроструктура сплава Fe – 28 Cr – 10 Co – 3,7 Mo – 0,5 Si после спекания при температуре 1420°C 2,5 часа показана на рис. 2. Структура состоит из

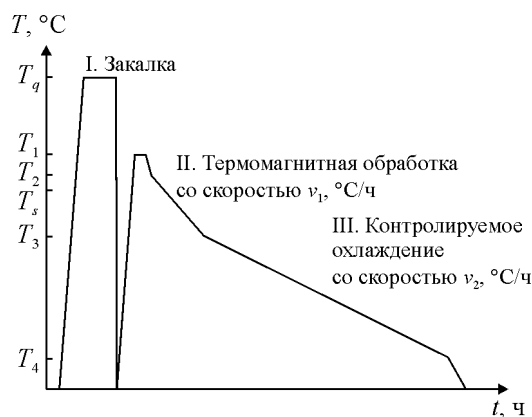


Рис. 1. Схема обработки магнитотвёрдых сплавов Fe – Cr – 10 Co.

сравнительно одинаковых по форме и размеру зерен α -фазы. Сплав находится в однофазном состоянии, что позволяет проводить термообработку на порошковых образцах после спекания без закалки.

На рис. 3 приведены графики зависимости магнитных гистерезисных свойств всех изучаемых серий сплавов от скорости охлаждения сплава v_1 . Для всех сплавов проводили одинаковую ТМО: закалка 1150°C 10 мин в воде, нагрев до температуры 720°C, выдержка в течение 15 мин, охлаждение в магнитном поле со скоростью v_1 °C/ч от температуры 660 до 600°C, последующее охлаждение без поля до температуры 500°C со скоростью 8°C/ч.

Значение остаточной индукции B_r для сплава Fe – 24,7 Cr – 10 Co – 2 Mo – 0,5 Si (серия № 5) выше, чем на других сплавах, а значение коэрцитивной силы падает с увеличением скорости охлаждения v_1 . Для сплава Fe – 28 Cr – 10 Co – 3,7 Mo – 0,5 Si (серия № 4)

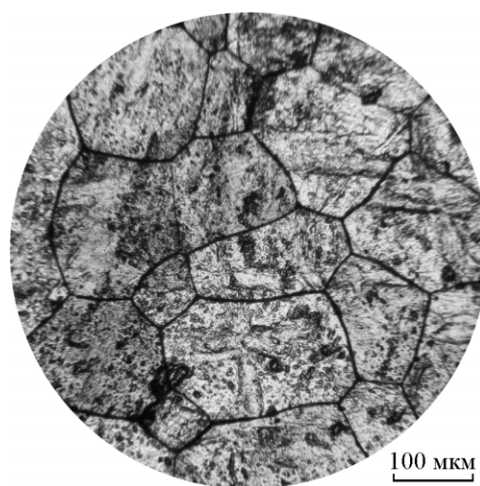


Рис. 2. Микроструктура сплава Fe – 28 Cr – 10 Co – 3,68 Mo – 0,5 Si после спекания при температуре 1420 °C 2,5 ч.

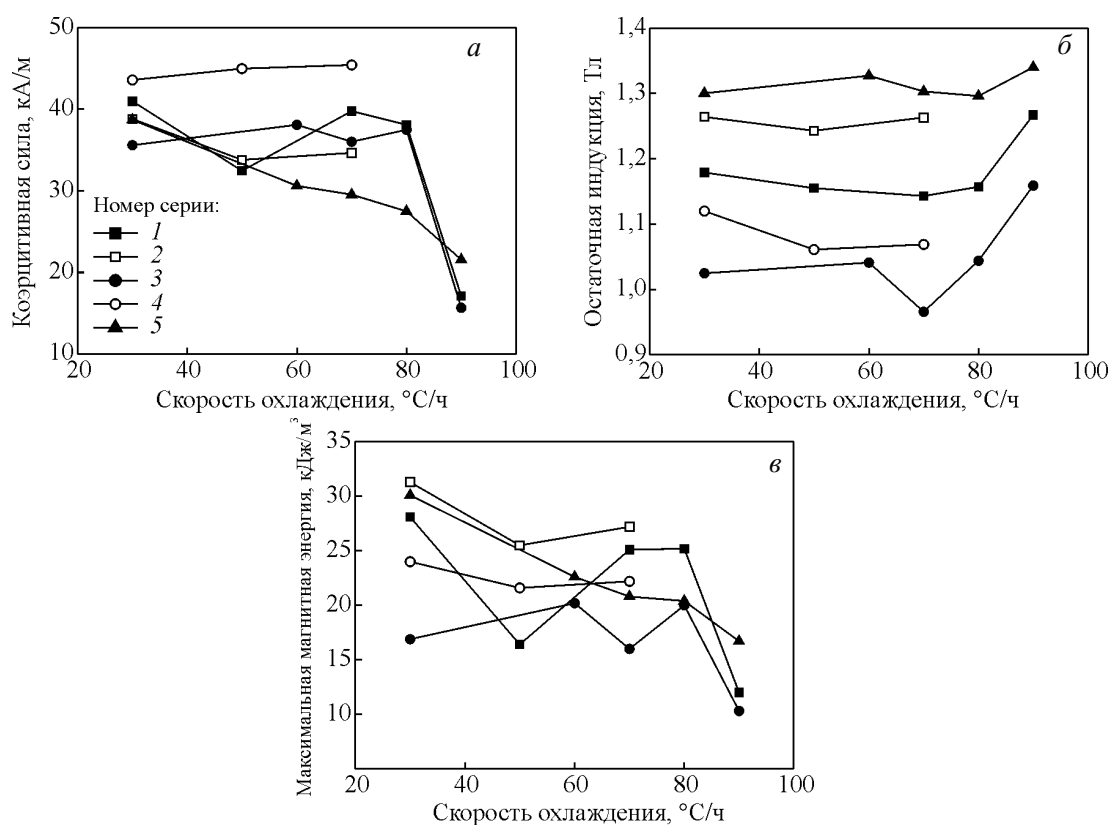


Рис. 3. Зависимость магнитных гистерезисных свойств сплавов Fe – Cr – 10 Co от скорости охлаждения сплава v_1 . Кривые 1 – 5 – номера серий 1 – 5, соответственно.

Таблица 2

Магнитные гистерезисные свойства сплавов Fe – Cr – 10 Co, полученных в работе и сравнение их с литературными данными

№ серии	Состав или марка сплава	Предварительная обработка	Режим обработки, литература			B_r , Тл	H_c , кА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м³	$(BH)_{max}/(B_r \cdot H_c)$
			T_1 , °C	T_2 , °C	v_1 , °C/ч				
1	Fe – 28 Cr – 10 Co – 2,0 Mo – 0,5 Si	Закалка от 1150 °C 10 мин в воде Без закалки	720	660	60	1,182	40,30	28,0	0,59
			720	660	60	1,179	42,50	30,7	0,61
2	Fe – 28 Cr – 10 Co – 0,3 Mo – 0,5 Si	Закалка от 1150 °C 10 мин в воде Без закалки	720	660	30	1,264	38,81	31,3	0,64
			700	660	30	1,259	38,65	33,0	0,68
3	Fe – 31,4 Cr – 10 Co – 2,0 Mo – 0,5 Si	Закалка от 1150 °C 10 мин в воде Без закалки	720	660	60	1,041	38,10	20,2	0,51
			720	660	90	1,084	39,10	23,1	0,55
4	Fe – 28 Cr – 10 Co – 3,7 Mo – 0,5 Si	Без закалки Закалка от 1150 °C 10 мин в воде Без закалки	700	660	90	1,019	46,31	21,6	0,46
			720	660	30	1,120	43,60	24,0	0,49
			720	660	30	0,967	43,02	17,2	0,41
5	Fe – 24,7 Cr – 10 Co – 2 Mo – 0,5 Si	Закалка от 1150 °C 10 мин в воде Закалка от 1150 °C 10 мин в воде	720	660	30	1,300	38,70	30,1	0,6
			720	660	90	1,340	21,57	16,7	0,58
		Без закалки	720	660	90	1,353	26,60	21,6	0,60
			700	660	120	1,355	14,90	9,4	0,47
	Fe – 28 Cr – 10 Co – 1,5 Mo				[2]	1,200	45,00	33,0	0,61
	25X15КА (ГОСТ 24897-81)				[4]	1,200	40,00	32,0	0,67
	ЮНДК (ГОСТ 17809-72)				[5]	1,250	52,00	44,0	0,68

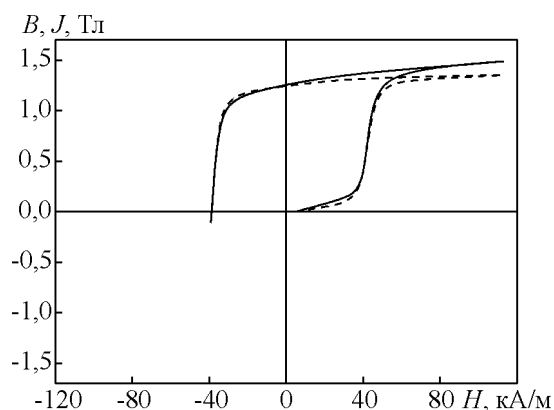


Рис. 4. Кривая размагничивания сплава Fe – 28 Cr – 10 Co – 0,3 Mo – 0,5 Si.

уровень коэрцитивной силы H_c выше, чем на других сплавах из-за наибольшего содержания легирующего элемента Mo, который повышает коэрцитивную силу сплава.

Полученные данные по влиянию скорости охлаждения сплава во время ТМО на магнитные гистерезисные свойства помогут в дальнейшем провести оптимизацию ТМО для получения максимальных свойств на данных сплавах.

В табл. 2 приведены магнитные гистерезисные свойства (B_r , H_c , $(BH)_{\max}$) сплавов Fe–Cr–10Co после разных термообработок. Рассмотрим влияние предварительной термообработки на магнитные свойства. В сплаве Fe – 24,7 Cr – 10 Co – 2 Mo – 0,5 Si (серия № 5) без предварительной обработки коэрцитивная сила — $H_c = 26,60$ кА/м больше, чем после закалки с 1150°C в воде — $21,57$ кА/м. А для сплава Fe – 28 Cr – 10 Co – 3,7 Mo – 0,5 Si (серия № 5) закалка 1150°C в воде приводит к повышению значения остаточной индукции до $1,120$ Тл против $0,967$ Тл. Для сплава Fe – 28 Cr – 10 Co – 3,7 Mo – 0,5 Si (серия № 2) близкий уровень магнитных гистерезисных свойств получается при изменении температуры начала обработки T_1 на 20°C . На многих образцах можно проводить термомагнитную обработку сразу после спекания.

Сравнение полученных в работе магнитных гистерезисных свойств порошковых сплавов с деформируемыми сплавами системы Fe – Cr – Co [4] и со сплавами системы Fe – Ni – Al – Co [5] позволяет сделать вывод, что на порошковых сплавах Fe – Cr – 10 Co с пониженным содержанием кобальта даже на не оптимизированных режимах термообработки

возможно получение магнитных гистерезисных свойств сравнимых с литыми сплавами.

На рис. 4 приведена кривая размагничивания для сплава Fe – 28 Cr – 10 Co – 0,3 Mo – 0,5 Si, на котором получена наибольшая в данной работе прямоугольность петли гистерезиса, она составляет $0,68$.

Выводы

Методами порошковой металлургии изготовлены магнитотвёрдые порошковые сплавы Fe – (24,6 – 31,4) Cr – 10 Co – (0,3 – 3,7) Mo – 0,5 Si с относительной плотностью $97,9$ – $99,9\%$. Наибольшие значения коэрцитивной силы $H_c = 46,31$ кА/м получены на сплаве Fe – 28 Cr – 10 Co – 3,7 Mo – 0,5 Si, остаточной индукции $B_r = 1,355$ Тл — на сплаве Fe – 24,7 Cr – 10 Co – 2 Mo – 0,5 Si, а максимальной магнитной энергии $(BH)_{\max} = 33$ кДж/м³ — на сплаве Fe – 28 Cr – 10 Co – 0,3 Mo – 0,5%Si.

Полученный уровень магнитных гистерезисных свойств на порошковых сплавах системы Fe – Cr – 10 Co соответствует уровню деформируемого промышленного сплава 25X15KA (ГОСТ 24897-81).

Автор выражает благодарность за помощь в проведении ряда экспериментов к.ф.-м.н., с.н.с. В.А. Зеленскому, с.н.с. А.Б. Анкудинову и А.А. Фоминой.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-03-31296).

Литература

1. Миляев А.И., Ковнеристый Ю.К., Ефименко С.П., Корзникова Г.Ф. Магнитные свойства деформируемого магнитотвердого FeCrCo сплава с 8 масс.% кобальта. Физика и химия обработки материалов, 2003, № 3, с. 86 – 88.
2. Chin T.-S., Chen T.H., Chen C.Y. Magnetic properties and microstructures of Fe – Cr – 10 wt.% Co – M (M = Si/Ti/Ni/Mo/Ge/Ta) permanent magnet alloys. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1985, v. 50, p. 214 – 222.
3. Chin T.-S., Lee P.Y., Chang C.Y., Wu T.S. Effect of alloying on magnetic properties of Fe – Cr – 12 wt.% Co permanent magnet alloy. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1984, v. 42, p. 207 – 216.
4. ГОСТ 24897-81. Материалы магнитотвердые деформируемые. Марки, технические требования и методы контроля. М. 1981.
5. ГОСТ 17809-72. Материалы магнитотвердые литые. Марки. М. 1972.

Статья поступила в редакцию 20.02. 2013 г.

Вомпе Татьяна Алексеевна — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (г. Москва), и.о. младшего научного сотрудника. Специалист в области магнитотвёрдых материалов. E-mail: tvompe@gmail.com.

Миляев Игорь Матвеевич — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (г. Москва), доктор технических наук, ведущий научный сотрудник. Специалист в области постоянных магнитов (магнитотвёрдых материалов). E-mail: imilyaev@imet.ac.ru.

Юсупов Владимир Сабитович — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (г. Москва), доктор технических наук, заведующий лабораторией. Специалист в области пластической деформации. E-mail: yusupov@aport2000.ru.