

Магнитные гистерезисные свойства Fe-26Cr-16Co порошковых магнитотвердых сплавов

Устюхин А.С.^{1,†}, Алымов М.И.^{1,2,‡}, Миляев И.М.¹

[†]fcbneo@yandex.ru; [‡]alymov@ism.ac.ru

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Ленинский пр., 49, 119991 Москва

²Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, ул. Академика Осипяна 8, 142432 Черноголовка

В работе методом порошковой металлургии получают магнитотвердые Fe-Cr-Co сплавы, исследуя при этом значительный интервал температур спекания. В качестве легирующих добавок используются молибден, вольфрам и кремний. Изучаются зависимости пористости и убыли массы от температуры спекания. Магнитные гистерезисные свойства сплавов исследуются для всех использованных режимов спекания.

Ключевые слова: порошковая металлургия, магнитотвердые сплавы Fe-Cr-Co, спекание, магнитные гистерезисные свойства.

Magnetic hysteresis properties of Fe-26Cr-16Co hard magnetic alloys

A.S. Ustyuhin¹, M.I. Alymov^{1,2}, I.M. Milyaev¹

¹Institute of Metallurgy and Material Science RAS, Leninskiy pr. 49, 119991 Moscow

²Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS, Academician Osipyan str., 8, 142432 Chernogolovka

In present work hard magnetic Fe-Cr-Co alloys obtained by powder metallurgy method, investigating significant sintering temperature range. Molybdenum, tungsten and silicon used as alloying additives. We study the dependence of porosity and mass losses from sintering temperature. Magnetic hysteresis properties of the alloys investigated for all used sintering modes.

Keywords: powder metallurgy, hard magnetic Fe-Cr-Co alloys, sintering, magnetic hysteresis properties.

1. Введение

Магнитотвердые сплавы системы Fe-Cr-Co относятся к деформируемым сплавам, как в горячем, так и в холодном состоянии, а также обладают довольно редким сочетанием высоких магнитных свойств с пластичностью и коррозионной стойкостью, что весьма хорошо с точки зрения требований, предъявляемых промышленностью к современным постоянным магнитам [1-3]. Сплавы данной группы магнитотвердых материалов пригодны для изготовления любой металлопродукции вплоть до микропроволоки или микроленты [4]. Проблема снижения температуры спекания изделий, получаемых методами порошковой металлургии, всегда остро стоит перед технологами, т.к. её успешное решение позволяет экономить потребляемые энергоресурсы, продлевать срок службы технологического оборудования, используемого в процессе спекания, улучшать условия труда обслуживающего персонала. В работах [5,6] было показано, что оптимальная температура спекания порошковых постоянных магнитов из магнитотвёрдых сплавов системы Fe-Cr-Co лежит в районе 1400°C. Но эта температура спекания достаточно высока для оборудования, используемого в производстве постоянных магнитов из

магнитотвёрдых сплавов системы Fe-Ni-Al-Co-Cu, которые аналогичны по своим магнитным гистерезисным свойствам магнитотвёрдым сплавам системы Fe-Cr-Co.

В данной работе с целью исследования совместного и раздельного влияния молибдена и вольфрама на температуру спекания порошковых магнитов из магнитотвёрдых Fe-Cr-Co сплавов были взяты сплавы составов Fe-26Cr-16Co-2Mo-2W, Fe-26Cr-16Co-2Mo, Fe-26Cr-16Co-2W, которые в свою очередь являются составной частью матрицы планирования экспериментов по исследованию магнитных гистерезисных свойств сплавов системы Fe-Cr-Co-Mo-W. Были изучены зависимости пористости и магнитных гистерезисных свойств от температуры спекания.

2. Получение образцов

При изготовлении порошковых образцов диаметром 13 мм и высотой 20 мм использовали промышленные высокочистые порошки железа (ПЖРВ, ГОСТ 9849-86) с размером частиц 0,05-0,07 мм, хрома, кобальта, молибдена и вольфрама с частицами < 0,07 мм. Их смешивание осуществляли в турбулентном смесителе С2.0,

прессование проводили на ручном прессе в разъемной матрице с внутренним диаметром 13,6 мм при давлении 600 МПа. Сырые прессовки имели относительную плотность ~ 75-80%. Спекание проводили в вакуумной шахтной печи СШВ-1,255/24-И1 в вакууме 10^{-2} Па при шести температурах: 1150, 1200, 1250, 1300, 1350 и 1420°C. После спекания образцы имели относительную плотность 92-98% в зависимости от температуры, сохраняли форму прессовок, но в силу использования схемы одностороннего прессования разница в размерах верхнего и нижнего диаметров составляла 0,2-0,3 мм на диаметре 13 мм.

Пористость спеченных материалов оценивали с помощью оптической системы анализа изображений на базе микроскопа OLYMPUS PME-3 и программы IA-32. Для металлографического исследования образцы из твердых спеченных сплавов приготавливались в виде микрошлифов. Были получены микрофотографии поверхности шлифа (см. рис.1), с помощью компьютерного анализа в программе IA-32 оценили остаточную пористость и размер пор.

3. Анализ полученных результатов

Выяснилось, что спекание при температурах от 1350°C и выше позволяет получать образцы с остаточной пористостью около 2-3% для всех составов. При понижении температуры спекания до 1200°C наблюдается постепенный рост остаточной пористости вплоть до 4,5-5% для сплава Fe-26Cr-16Co-2Mo-0,5Si, 5,5-6% для сплава Fe-26Cr-16Co-2Mo-2W-0,5Si и до 7% для сплава Fe-26Cr-16Co-2W-0,5Si. Данные различия в полученных результатах для исследуемых сплавов можно объяснить известным фактом, что молибден понижает температуры ликвидуса и солидуса в сплавах на основе системы Fe-Cr-Co [7]. Это благоприятствует процессу спекания и способствует получению менее пористых образцов магнитотвердого сплава. Размер пор варьировался в интервале 5-7 мкм, распределение пор было примерно одинаковым по поверхности шлифа.

Измерение магнитных гистерезисных свойств проводили на гистерезисграфе Permagraph L. Изучение влияния термообработки на магнитные гистерезисные свойства исследуемого сплава проводили после закалки образцов от 1250°C в воде в зависимости от скорости охлаждения в магнитном поле в температурном интервале 660 – 620°C, т.е. в температурном интервале формования высококоэрцитивного состояния. Старение образцов после проведения термомагнитной обработки проводили путём охлаждения в температурном интервале 620 – 500°C со скоростью 8°C/ч. Было проведено также изучение влияния начальной стадии старения на магнитные гистерезисные свойства исследуемого сплава. Результаты измерения магнитных свойств и сравнительная характеристика H_{cb} и $(BH)_{max}$ для трёх составов представлены в таблице 1 и на рис.2а,б.

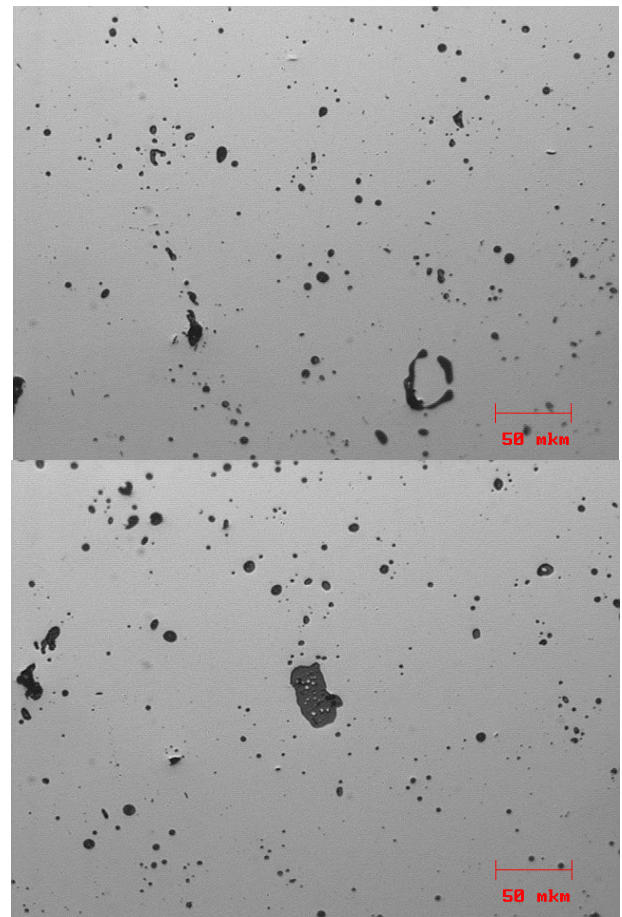


Рис. 1. Микрофотографии шлифа магнитотвердого сплава Fe-26Cr-16Co-2Mo-2W-0,5Si, спеченного при 1420°C, в режиме определения пористости.

Как видно из рисунков, сплав, легированный совместно молибденом и вольфрамом, обладает повышенной коэрцитивной силой во всем температурном интервале спекания, но несколько худшем энергетическом произведении вплоть до 1300°C. Для сплава Fe-26Cr-16Co-2Mo-2W-0,5Si наилучшие магнит-

Таблица 1.

Зависимость магнитных гистерезисных свойств сплава Fe-26Cr-16Co-2Mo-2W-0,5Si от температуры спекания

Температура спекания, °C	Br, Тл	H _{cb} , кА/м	(BH) _{max} , кДж/м3
1150	0,95-1,01	42,0-47,8	18,5-22,3
1200	1,04-1,07	51,8-53,5	26,6-28,6
1250	1,07-1,10	53,4-55,9	27,1-30,2
1300	1,09-1,16	57,1-59,4	28,8-33,2
1350	1,08-1,15	56,1-58,1	27,3-32,3
1420	1,06-1,15	53,0-57,1	23,2-28

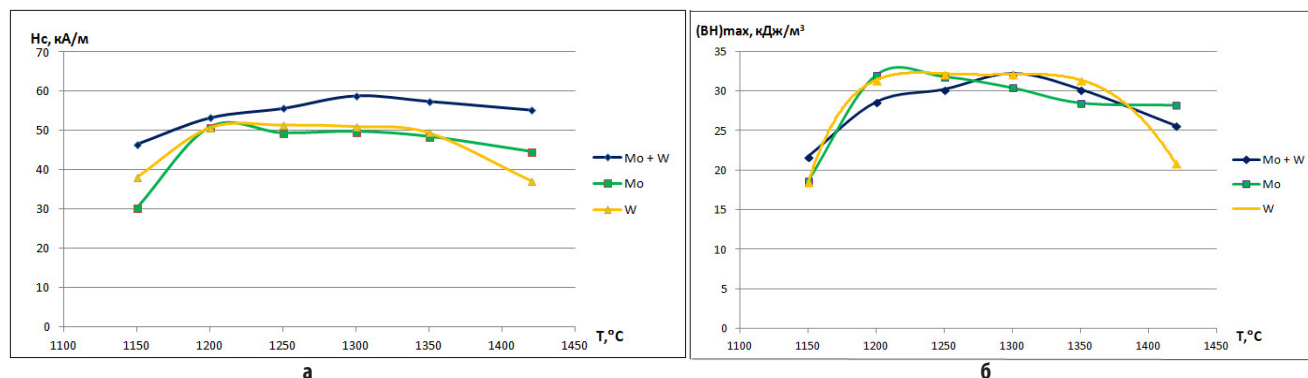


Рис. 2. Сравнение коэрцитивной силы (а) и максимального энергетического произведения (б) для Fe-26Cr-16Co сплавов в зависимости от температуры спекания.

ные свойства получились при спекании в районе 1300°C, а для сплавов отдельно с Mo и W одинаковый уровень свойств наблюдается в интервале 1200 - 1300°C. Стоит отметить, что в отличие от предыдущих похожих работ с другими сплавами этой системы магнитные свойства при повышении температуры спекания до 1420°C снижаются. Как выяснилось, это связано с возникновением довольно серьезной неоднородности по химическому составу между поверхностным слоем и объемом образца из-за испарения хрома в ходе спекания. Разница в концентрациях хрома на поверхности и в объеме образца растет с увеличением температуры спекания и достигает максимума при 1420°C. Этот процесс связан с тем, что давление насыщенных паров хрома гораздо выше по сравнению с остальными компонентами сплава, а для самого хрома при 1420°C оно примерно в 10 раз больше, чем при 1300°C.

4. Заключение

Наилучшие магнитные свойства ($B_r=1,16$ Тл, $H_{cb}=59,4$ кА/м, $(BH)_{max}=33,2$ кДж/м³) наблюдались у сплава Fe-26Cr-16Co-2Mo-2W-0,5Si, спеченного при 1300°C. Данный сплав по своим магнитным гистерезисным характеристикам удовлетворяет гос. стандартам для Fe-Cr-Co магнитотвёрдого материала 30X23K (ГОСТ 24897—81) ($B_r=1$ Тл, $H_{cb}=55$ кА/м, $(BH)_{max}=30$ кДж/м³), но при этом более технологичен в производстве с точки зрения проведения спекания, приближаясь по этой технологической операции к порошковым магнитотвёрдым сплавам алнико.

В зависимости от температуры спекания в сплавах возникает неоднородность состава, связанная с испарением хрома. Наибольшее испарение наблюдается при 1420°C и, в свою очередь, для сплавов Fe-26Cr-16Co

сильнее ухудшает магнитные свойства, нежели пористость.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-08-31373-мол_а.

Литература

1. I.V. Cherednichenko, R.I. Malinina, V.S. Shubakov, A.S. Perminov, V.P. Menushenkov, E.H. Dinislamova. *Fizika i Khimiya obrabotki materialov*. **3**, 78 (2011). (in Russian) [И.В. Чередниченко, Р.И. Малинина, В.С. Шубаков, А.С. Перминов, В.П. Менушенков, Э.Х. Динисламова. *Физика и химия обработки материалов*. **3**, 78 (2011).]
2. L. Zhen, X.-Y. Sun, C.-Y. Xu, R.-Sh. Gao, R.-G. Xu, L.-Ch. Qin. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. **17**, 346 (2007).
3. T. Kubota, G. Wakui, I.M. Itakagi. *IEEE Transactions on Magnetics*. **34**(6), 3888 (1998).
4. M.A. Libman. *Materialovedenie*. **9**, 58 (2010). (in Russian) [М.А. Либман. *Материаловедение*. **9**, 58 (2010).]
5. I.M. Milyaev, M.I. Alymov, V.S. Yusupov, V.A. Zelenskiy, A.B. Ankudinov, A.I. Milyaev. *Proceedings of Higher Schools. Powder Metallurgy and Functional Coatings*. **4**, 54 (2011). (in Russian) [И.М. Мильяев, М.И. Алымов, В.С. Юсупов, В.А. Зеленский, А.Б. Анкудинов, А.И. Мильяев. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. **4**, 54 (2011).]
6. M.I. Alymov, A.B. Ankudinov, V.A. Zelenskiy, I.M. Milyaev, V.S. Yusupov, A.S. Ustyuhin. *Fizika i Khimiya obrabotki materialov*. **3**, 34 (2011). (in Russian) [М.И. Алымов, А.Б. Анкудинов, В.А. Зеленский, И.М. Мильяев, В.С. Юсупов, А.С. Устюхин. *Физика и химия обработки материалов*. **3**, 34 (2011).]