

УДК 620.17:620.18

МАГНИТНЫЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ СВОЙСТВА ДЕФОРМИРУЕМОГО МАГНИТОТВЕРДОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Fe-Cr-Co С ПОНИЖЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КОБАЛЬТА

Ирина Сергеевна Пудовкина

Студент 6 курса,

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им.Н.Э. Баумана

Научный руководитель: С.А.Пахомова,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Магнитотвердые сплавы на основе системы Fe-Cr-Co (ГОСТ 24897–81) относятся к деформируемым в горячем и холодном состоянии сплавам. Они отличаются сочетанием высоких магнитных свойств и прочности, коррозионной стойкости и пластичности в определенных структурных состояниях (рис. 1).

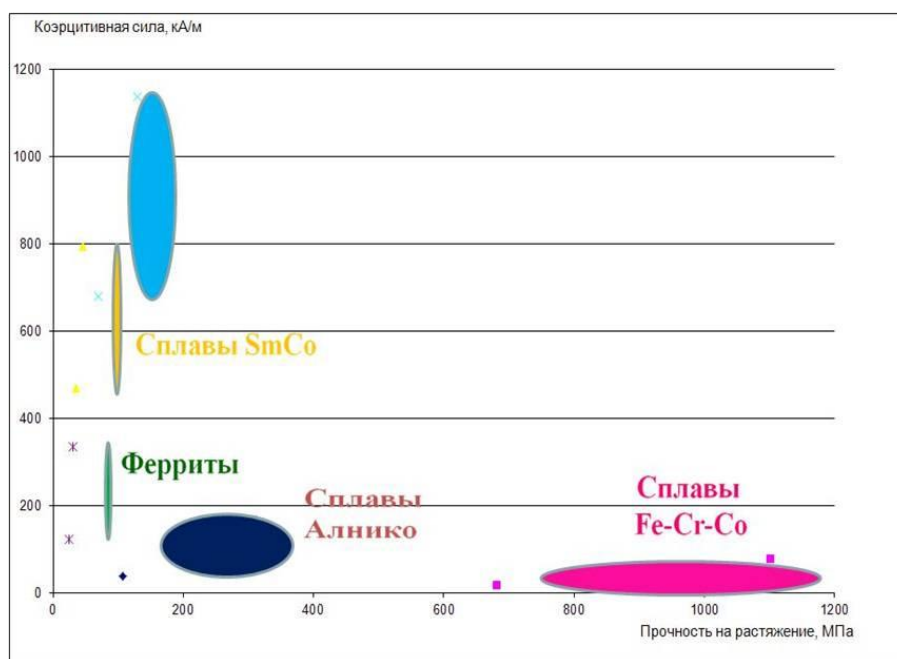


Рис.1. Соотношение коэрцитивной силы и прочностных характеристик распространенных магнитов

Высококоэрцитивное состояние в сплавах Fe-Cr-Co возникает в результате спинодального распада α - твердого раствора с ОЦК решеткой на две изоморфные ОЦК фазы: α_1 и α_2 , из которых фаза α_1 обогащена железом и кобальтом, а фаза α_2 — хромом в процессе терромагнитной обработки (ТМО) или предварительной пластической деформации и последующих многоступенчатых отпусков.

Обработка Fe-Cr-Co сплавов с 3...5 масс. % Co позволила получить высокие магнитные свойства ($(BH)_{\text{макс.}} > 40 \text{ кДж/м}^3$, $B_r > 1,3 \text{ Тл}$, $H_{\text{св}} > 45 \text{ кЭ}$). Это свидетельствует о возможности снижения содержания кобальта в Fe-Cr-Co сплавах до

определенного уровня, обеспечивающего получение высоких магнитных свойств. Однако следует учитывать, что с уменьшением содержания кобальта увеличивается время, затрачиваемое на ТМО сплава. Представляет интерес разработка магнитотвердых деформируемых сплавов с содержанием кобальта на уровне 8...10 масс. % для достижения наибольшей экономической эффективности.

Цель работы: определение магнитных свойств и изучение структуры сплава Fe-26Cr-13Co, дополнительно легированного Ti, Si, Mo, Nb, V и Ni для дальнейшего определения оптимального режима обработки.

Исходными материалами служат литые образцы состава: Fe – основа, 25,7 % Cr; 13,1 % Co; 2,03 % Ti; 1,24 % Si; 0,98 % Mo; 0,84 % V; 0,75 % Nb; 0,70 % Ni. Образцы длиной 20 мм получали из сортового проката диаметром 14 мм путем токарной обработки на диаметр 12 мм.

Стандартная термообработка сплавов на основе Fe-Cr-Co на высококоэрцитивное состояние состоит из термоманитной обработки и многоступенчатых отпусков с постепенным снижением температуры каждой ступени отпуска на 15...200 °С, либо характеризуется критической скоростью охлаждения в том же температурном интервале 700...500 °С.

Предполагаемая ТМО исследуемого сплава (рис.2) следующая.

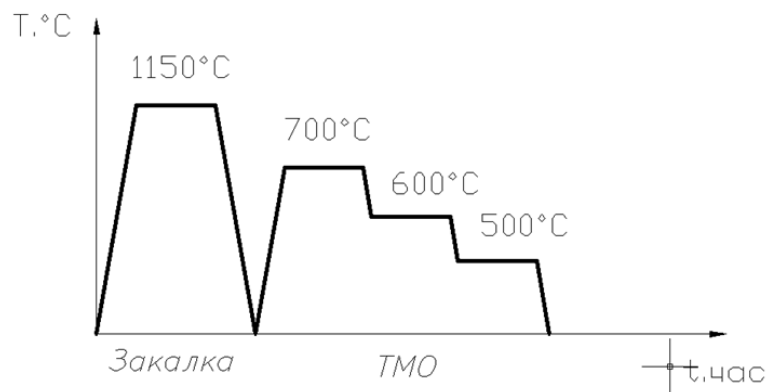


Рис.2. Схема термоманитной обработки

1. Закалка на 1150 °С. Она производится из однофазной α -области с целью фиксации метастабильного α -твёрдого раствора и подавления выделения неферромагнитной γ -фазы. Выбор подходящей температуры закалки осуществлен на основании изотермических сечений (рис. 3, 4).

2. Нагрев до температуры 700 °С. Выдержка при этой температуре в течение 10...15 минут. В этом интервале температур α -твёрдый раствор распадается на ферромагнитную α_1 -фазу (Co + Fe) и немагнитную α_2 -фазу (Cr). Получили немагнитную матрицу, в которой находятся магнитные частички, тормозящие перемещение границ доменов.

3. Быстрое охлаждение в интервале температур 700...600 °С в магнитном поле со скоростью V_1 °С/ч.

4. Медленное охлаждение в интервале температур 600...500 °С со скоростью V_2 °С/ч.

Термическую обработку проводили в муфельных печах, оборудованных системами автоматического и программируемого регулирования температуры, ТМО осуществляли в лабораторной установке с панцирным электромагнитом, обеспечивавшим напряженность магнитного поля $H=320$ кА/м.

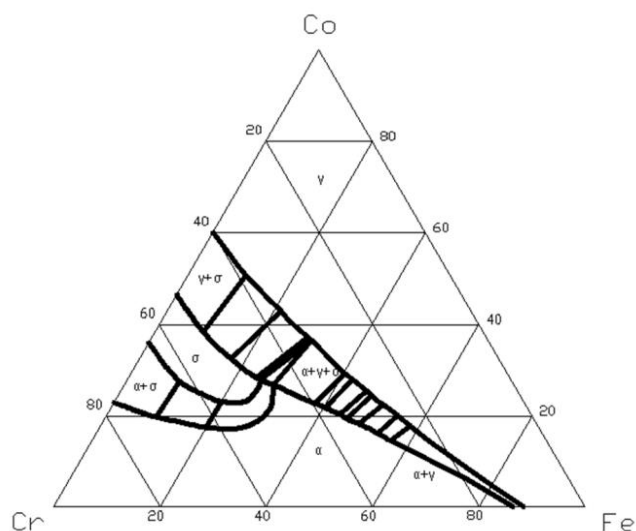


Рис.3. Изотермическое сечение диаграммы состояния Fe-Cr-Co, 1100 °C

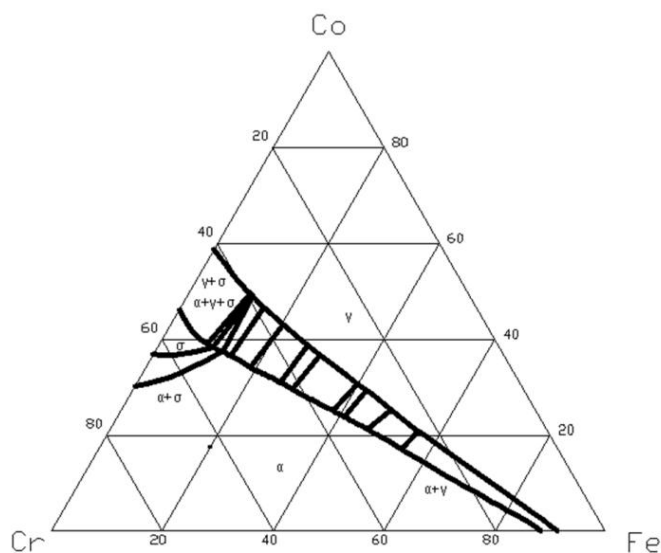


Рис.4. Изотермическое сечение диаграммы состояния Fe-Cr-Co, 1200 °C

Температуру ТМО и скорость охлаждения образцов в магнитном поле в заданном интервале температур измеряли хромель-алюмелевой термопарой, помещаемой непосредственно между образцов. Регулирование температуры осуществляли с помощью программируемых приборов ПРОТАР 101 и ПРОТЕРМ. Травление шлифов для выявления микроструктуры проводили царской водкой (1 часть HNO_3 и 3 части HCl).

Исследование структуры проведены на металлографическом микроскопе «Olympus GX51». Предварительно для уточнения температуры начала ТМО проведен ряд обработок. В табл. 1 указаны соответствующие им магнитные гистерезисные свойства. Ниже приведены структуры, полученные после каждой обработки (рис. 5), которые представляют собой неоднородный твердый раствор, что дает основания полагать, что полученные магнитные свойства не соответствуют уровню максимально ожидаемых.

Таблица 1. Выбор температуры начала ТМО

№	Температура начала ТМО	Вг, Тл	Нс, кА/м	(ВН) ^{max} , кДж/м ³
1	640	1,104	29,29	15,2
2	650	1,088	32,93	17,5
3	660	1,095	34,54	18,9
4	670	1,138	28,97	15,2
5	680	1,082	33,53	18,3
6	690	1,087	34,99	19,5

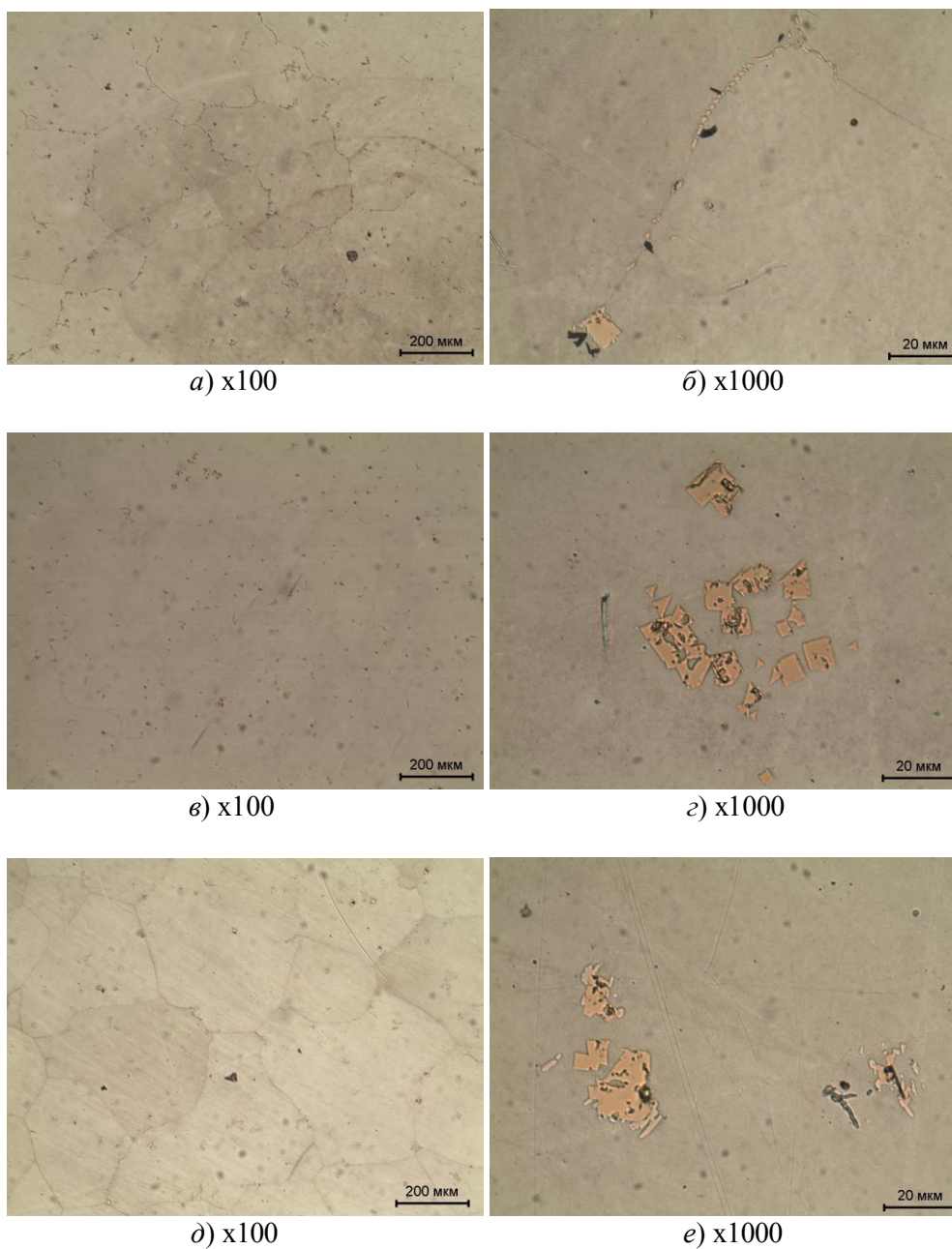


Рис.5. Структура, соответствующая режимам 1 (а, б), 3 (в, г), 5 (д, е)

Магнитные свойства измеряли на гистерезисографах Permagraph L и УИ.ФИ-400\5-003. Пример петли гистерезиса приведен на рис.6.

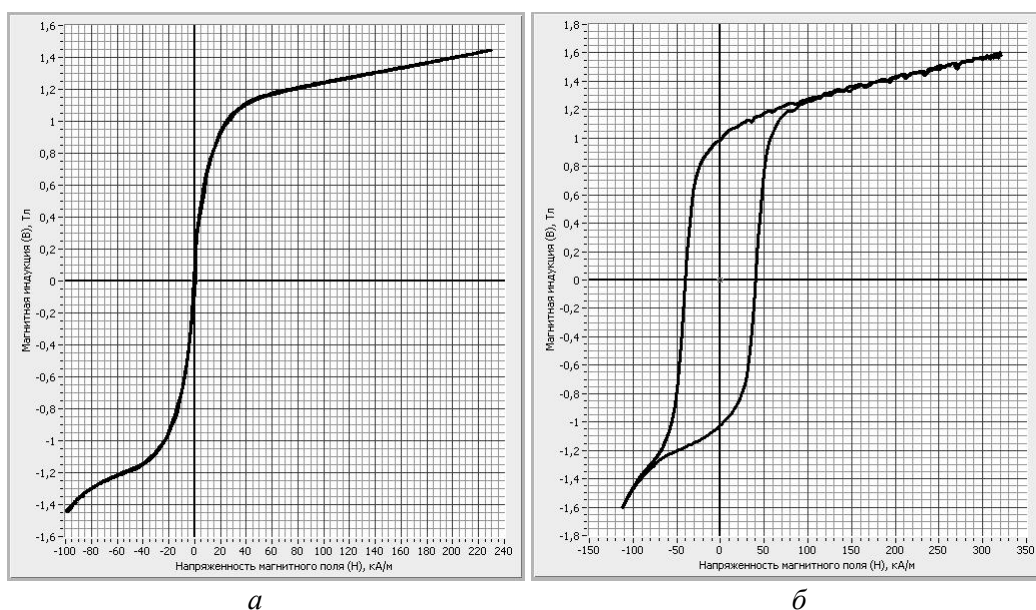


Рис.6. Петля гистерезиса образца после закалки (а) и образца после ТМО (б)

Оптимизацию магнитных гистерезисных свойств сплава проводили методом планирования эксперимента, обработку результатов осуществляли с помощью пакета программ Statgraphics Plus 6.0. Режимы ТМО подробнее описаны в табл. 2.

Таблица 2. Скорости, соответствующие проведенным ТМО, и магнитные свойства

№	$V_1, ^\circ\text{C}/\text{ч}$	$V_2, ^\circ\text{C}/\text{ч}$	$B_r, \text{Тл}$	$H_c, \text{кА/м}$
1	100	7	1,10	39,59
2	120	11	0,90	34,80
3	80	5	1,11	38,10
4	80	11	1,14	24,30
5	100	4	1,04	42,92
6	120	5	0,89	36,27
7	25	7	0,95	28,80
8	120	7	0,86	30,45
9	25	7	1,06	33,85
10	100	7	1,18	30,75
11	100	12	1,08	26,86

Образцы подвергались ТМО по следующему режиму: закалка от 1150 °С в воду, нагрев до температуры T_1 (700 °С), выдержка в течение 20 мин, охлаждение в магнитном поле со скоростью V_1 в интервале температур $T_2...T_3$ (700...600 °С), выдержка 60 мин, охлаждение до температуры T_4 (500 °С) со скоростью V_2 без магнитного поля.

На рис. 7, 8 приведены поверхности, представляющие собой наглядные зависимости остаточной индукции и коэрцитивной силы от изменяющихся скоростей охлаждения на разных этапах ТМО, которые, однако, не дают конкретных рекомендаций, т.к. показывают необходимость в дополнительных исследованиях. Предположительно выявлена оптимальная ТМО, состоящая в охлаждении со

скоростями V_1 около 80 °C/ч и v_2 8 °C/ч.

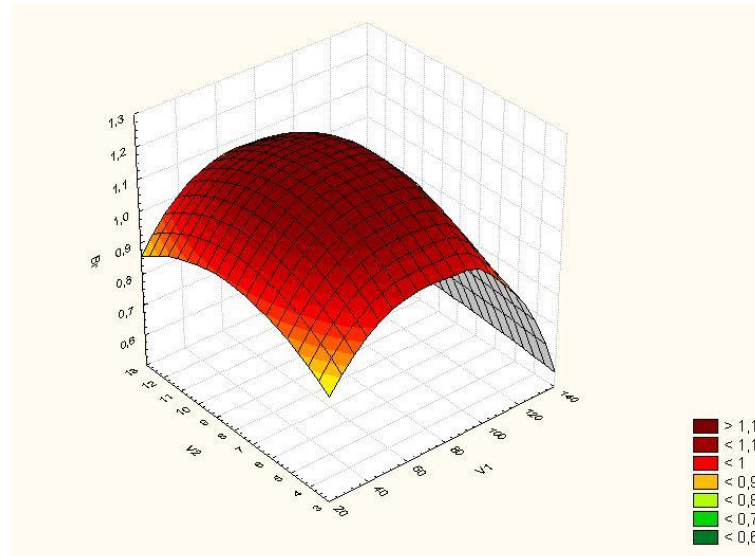


Рис.7. Зависимость остаточной индукции от скоростей охлаждения образцов

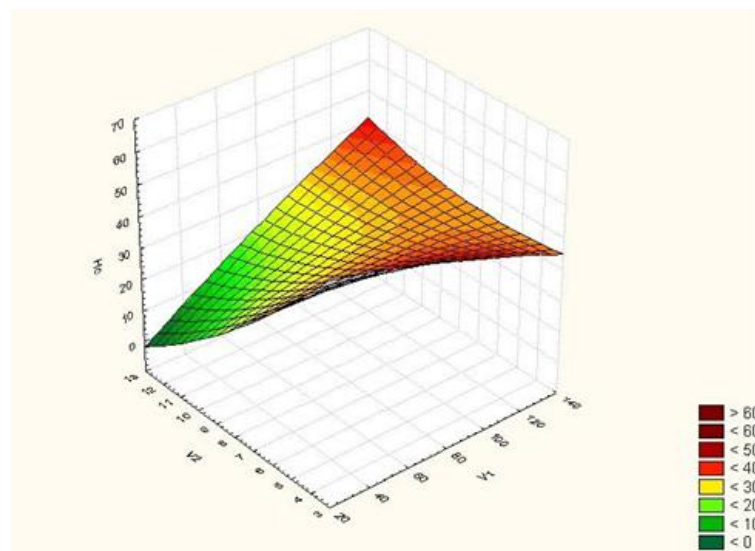


Рис.8. Изменение коэрцитивной силы в зависимости от скоростей охлаждения

Литература

1. Kaneko H., Homma M. and Nakamura K. New Ductile Permanent Magnet of Fe-Cr-Co System. // AIP Conference Proceedings. Magnetism and Magnetic Materials. – 1971, – № 5. – P. 1088-1092.
2. Белозеров Е.В., Мушников Н.В., Иванова Г.В., Щеголева Н.Н., Сериков В.В., Клейнерман Н.М., Вершинин А.В., Уймин М.А. Высокопрочные магнитотвердые сплавы на основе Fe-Cr-Co с пониженным содержанием хрома и кобальта. // Физика металлов и металловедение. – 2012, Т.113. - № 4. – С. 339.