



УДК 621.762; 669.1

## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВОГО МАГНИТОТВЁРДОГО СПЛАВА 27X10KM

### MAGNETIC PROPERTIES OF POWDER MAGNETOSOLID ALLOY 27X10KM

#### Абашев Денис Маратович

начальник цеха АО «Спецмагнит»  
d.abashev@gmail.com

#### Миляев Игорь Матвеевич

доктор технических наук,  
главный научный сотрудник,  
Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)  
imilyaev@mail.ru

#### Алымов Михаил Иванович

член-корреспондент РАН,  
доктор технических наук, директор,  
Институт макрокинетики и материаловедения  
Российской академии наук (ИСМАН РАН)  
alymov@ism.ac.ru

#### Буряков Илья Николаевич

кандидат технических наук,  
генеральный директор,  
АО «Спецмагнит»  
bouriakov@mail.ru

#### Юсупов Владимир Сабитович

доктор технических наук,  
заведующий лабораторией,  
Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)  
yusupov@aport2000.ru

#### Зеленский Виктор Александрович

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)  
zelensky55@bk.ru

#### Лайшева Надежда Владимировна

научный сотрудник,  
Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

**Аннотация.** Изучены магнитные гистерезисные свойства магнитотвёрдого сплава 27X10K2M (Fe-27Cr-10Co-1Mo). После проведения оптимальной термообработки, полученной с использованием программ Statgraphics Centurion, получены: остаточная индукция  $B_r$  до 1,39 Тл, коэрцитивная сила  $H_{CB}$  свыше 45 кА/м и максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{\text{макс}}$  до 45 кДж/м<sup>3</sup>, что превышает аналогичные свойства промышленного железохромкобальтового сплава 25X15KA (ГОСТ 24897-81) в среднем на 15–20 %. Показано, что оптимальная термическая обработка различна для получения оп-

#### Abashev Denis Maratovich

Foreman of JSC Spetsmagnit  
d.abashev@gmail.com

#### Milyaev Igor Matveevich

Doctor of Engineering,  
Chief Researcher,  
Institute of metallurgy and materials science  
of A.A. Baykov of the Russian Academy of  
Sciences (IMET RAS)  
imilyaev@mail.ru

#### Alymov Mikhail Ivanovich

Corresponding member of RAS,  
Doctor of Engineering, Director,  
Institute of macrokinetics and materials  
science of the Russian Academy of  
Sciences (ISMAN RAHN)  
alymov@ism.ac.ru

#### Buryakov Ilya Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences,  
CEO of JSC Spetsmagnit  
bouriakov@mail.ru

#### Yusupov Vladimir Sabitovich

Doctor of Engineering,  
Head of the laboratory,  
Institute of metallurgy and materials science  
of A.A. Baykov of the Russian Academy of  
Sciences (IMET RAS)  
yusupov@aport2000.ru

#### Zelensky Victor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Research Associate,  
Institute of metallurgy and materials science  
of A.A. Baykov of the Russian Academy of  
Sciences (IMET RAS)  
zelensky55@bk.ru

#### Laysheva Nadezhda Vladimirovna

Research Associate,  
Institute of metallurgy and materials science  
of A.A. Baykov of the Russian Academy of  
Sciences (IMET RAS)

**Annotation.** Magnetic hysteresis properties of magnetosolid alloy 27X10K2M (Fe-27Cr-10Co-1Mo) are studied. After carrying out the optimum heat treatment received with use of the Statgraphics Centurion programs are received: residual induction of  $B_r$  up to 1,39 T, the coercive force  $H_{CB}$  over 45 kA/m and the maximum power work  $(BH)_{\text{макс}}$  up to 45 kJ/m<sup>3</sup> that exceeds similar properties of industrial zhelezokhromkobaltovy alloy 25X15KA (GOST 24897-81) on average for 15–20 %. It is shown that optimum heat treatment is various for obtain-



тимальных значений остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы  $H_{CB}$  и максимального энергетического произведения  $(BH)_{\max}$ .

**Ключевые слова:** магнитотвердый сплав, остаточная индукция, коэрцитивная сила, максимальное энергетическое произведение, намагниченность, порошковая металлургия, термоманнитная обработка, поверхность отклика.

ing optimum values of residual induction of  $B_r$ , coercive force of NSV and the maximum power work  $((BH)_{\max})$ .

**Keywords:** magnetosolid alloy, residual induction, coercive force, maximum power work, magnetization, powder metallurgy, thermomagnetic processing, response surface.

## Введение

Интерес к низкокобальтовым магнитотвёрдым сплавам системы Fe-Cr-Co связан с их высокой экономической эффективностью и высокими пластическими свойствами, позволяющими их использовать в качестве сферических мембран в телефонных трубках, в магнитно-поляризованных реле, в ряде других малогабаритных устройствах радиоаппаратуры и аппаратуры средств связи [1]. На сплавах с 4–10 масс. % кобальта получены значения магнитного энергетического произведения  $(BH)_{\max}$  свыше 40 кДж/м<sup>3</sup>, что делает их вполне конкурентоспособными со сплавами ЮНДК24, содержащих в 5–6 раз больше дорогого и остродефицитного кобальта [2–3].

Однако, недостатком низкокобальтовых FeCrCo сплавов является низкая скорость формирования в них высококоэрцитивного состояния (скорость охлаждения в магнитном поле от оптимальных температур расслоения высокотемпературного  $\alpha$ -твёрдого раствора до 500 °С 0,4–4,4 °С/час в зависимости от содержания кобальта), которая представляет определённые трудности при промышленном производстве постоянных магнитов из этих сплавов с точки зрения производительности всего технологического процесса [4].

Целью настоящей работы было изучение хода формирования эксплуатационных магнитных гистерезисных свойств магнитотвёрдого FeCrCo сплава с 10 масс. % кобальта и 1 масс. % молибдена. Молибден был выбран в качестве дополнительного легирующего компонента в связи с тем, что в ряде других FeCrCo магнитотвёрдых сплавах он заметно повышает коэрцитивную силу и повышает другие гистерезисные свойства [5–10].

## Материалы и методики проведения экспериментов

Для приготовления порошковых образцов исследуемого сплава были использованы порошки железа (марки ПЖРВ1 ГОСТ 9849-86), хрома (ПХЕ1), кобальта (ПК-1у ГОСТ 9721-79) и восстановленный порошок молибдена (рядовой ПМ99,9) с размером частиц < 0,07 мм. Их смешивали в турбулентном смесителе С2.0 в течение 2–3 часов. Механоактивацию полученной порошковой смеси проводили путём помола в планетарной мельнице Pulverizette-7 в течение 15 минут со скоростью 600 об/мин. В ряде случаев в порошковую смесь добавляли поверхностно-активные вещества (ПАВ) в виде стеариновой или олеиновой кислоты. Формование заготовок образцов проводили на ручном прессе в разъёмной матрице с внутренним диаметром 13,6 мм при давлении 600 МПа. Сырые прессовки имели относительную плотность 78–80 %. Спекание проводили в вакуумной шахтной печи СШВ-1,25/24-И1 в вакууме 10<sup>-2</sup> Па при температуре 1420 °С в течение 2,5 часов. После спекания образцы полностью сохраняли форму прессовок, имели плотность 94–96 %, но в силу использования схемы одностороннего прессования разница в размере верхнего и нижнего диаметров образцов составляла до 0,2 мм. Легирующую добавку молибдена вводили сверх 100 % базового состава Fe-27Cr-10Co.

Термическую обработку спечённых порошковых образцов проводили в стандартных муфельных печах в контейнере диаметром 60 мм, заполненным металлическим балластом с целью моделирования реальных производственных условий. Температурно-временные режимы термообработки регулировали с помощью программируемых пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов ТРМ251. Термомагнитную обработку проводили в лабораторной установке с панцирным электромагнитом в магнитном поле  $H = 320$  кА/м (> 4000 Э).

Магнитные гистерезисные свойства образцов исследуемого сплава измеряли на гистерезис-графе «Permagraph L» (Германия).

Изучение магнитных гистерезисных свойств сплава 27Х10КМ и оптимизацию режима его термической обработки проводили как методом однофакторного эксперимента, так и методом планирования эксперимента с построением центрального композиционного плана 2<sup>3</sup> + звёздные точки [11].

Выбор центрального композиционного (последовательного) плана, применяемого, как правило, для описания почти стационарной области, которая не может быть описана с помощью линейного приближения, был обусловлен тем обстоятельством, что предварительные эксперименты по оценке магнитных гистерезисных свойств после термообработки по режиму близкому к нулевому не показали резких колебаний. Выбранный план – ротатабельный (т.е. информация, содержащаяся в уравнении регрессии, равномерно распределена по сфере, на которой выбираются точки проведения эксперимента, и исследователь заранее не знает той области поверхности отклика, где находится интересу-



ющий его оптимальный участок) и рандомизированный (порядок проведения эксперимента определяется случайным образом). Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием программного пакета «Statgraphics Centurion XVI».

Исходя из существующего понимания механизма формирования высококоэрцитивного состояния в магнитотвёрдых Fe-Cr-Co-сплавах [12], считали, что в общем случае магнитные гистерезисные свойства зависят от таких параметров как: 1 – температура закалки на α-твёрдый раствор; 2 – температура и время проведения изотермической термомагнитной обработки (ИТМО) или, что эквивалентно, от скорости охлаждения V1 от температуры начала термомагнитной обработки (ТМО) до температурного интервала 580–600 °С; 3 – скорость охлаждения V2 от температурного интервала 580–600 °С до 500 °С. Влияют также и другие факторы как, например, скорость нагрева до температуры начала ТМО, время выдержки при температуре начала ТМО и другие, которые в данной работе по возможности стабилизировали. В частности, закалку образцов в воде проводили от 1100 °С с выдержкой в течение 15 минут, нагрев контейнера до температуры начала ТМО осуществляли в течение 40–50 мин, время выдержки при температуре начала ТМО составляло 10 минут.

### Результаты исследования и их обсуждение

При изучении анизотропных образцов сплава 27X10KM в качестве нулевого (начального) режима был взят режим: нагрев до 660 °С (начальная температура ТМО) + охлаждение в магнитном поле до 580 °С со скоростью V1 = 15 °С/час + охлаждение до 500 °С без магнитного поля со скоростью V2 = 7 °С/час + дополнительный отпуск при всех последующих режимах термической обработки в температурном интервале 500–460 °С. Варьирование начальной температуры ТМО составляло ± 10 °С, скоростей охлаждения V1 и V2 – ± 2 °С/час. Результаты проведенных экспериментов совместно с матрицей планирования приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Магнитные гистерезисные свойства анизотропных образцов сплава 27X10KM

№ п/п	Температура начала ТМО, °С	Скорость охлаждения V1 до 580 °С, °С/час	Скорость охлаждения V2 до 500 °С, °С/час	B <sub>r</sub> , Тл	H <sub>св</sub> , кА/м	(BH) <sub>макс</sub> , кДж/м <sup>3</sup>
1	650 (-1)	13 (-1)	9 (1)	1,33	35,3	29,5
2	660 (0)	18,4 (1,68)	7 (0)	1,35	42,7	36,9
3	660 (0)	15 (0)	10,4 (1,68)	1,33	43,0	37,4
4	643 (-1,68)	15 (0)	7 (0)	1,326	41,3	35,1
5	650 (-1)	17 (1)	5 (-1)	1,35	44,25	40,6
6	650 (-1)	13 (-1)	5 (-1)	1,34	36,8	33,5
7	660 (0)	15 (0)	7 (0)	1,35	44,5	40,1
8	660 (0)	11,6 (-1,68)	7 (0)	1,31	44,6	39,8
9	670 (1)	13 (-1)	5 (-1)	1,33	44,9	40,0
10	670 (1)	13 (-1)	9 (1)	1,33	42,95	37,5
11	670 (1)	17 (1)	9 (1)	1,36	44,8	40,4
12	677 (1,68)	15 (0)	7 (0)	1,316	43,9	37,2
13	670 (1)	17 (1)	5 (-1)	1,34	44,4	40,2
14	650 (-1)	17 (1)	9 (1)	1,36	41,9	35,7
15	660 (0)	15 (0)	3,6 (-1,68)	1,34	45,05	41,4
16	660 (0)	15 (0)	7 (0)	1,34	42,5	40,6
17	660 (0)	15 (0)	7 (0)	1,33	43,0	38,2

Проведенный статистический анализ данных таблицы 1, выполненный с помощью программ Statgraphics Centurion XVI, с учётом соответствующих диаграмм Парето (рис. 1) дал возможность получить аналитические зависимости в виде регрессионных уравнений остаточной индукции B<sub>r</sub>, коэрцитивной силы H<sub>св</sub> и максимального энергетического произведения (BH)<sub>макс</sub> от выбранных факторов варьирования:

$$B_r = 1,34 + 0,1 V. \tag{1}$$

$$H_{св} = 43,4 + 1,7 A. \tag{2}$$

$$(BH)_{макс} = 39,7 + 1,635 A. \tag{3}$$

В уравнениях (1) – (3) свободные члены дают средние значения указанных параметров сплава в анизотропном состоянии в выбранных пределах варьирования факторов. Уравнения (1) – (3) адекватно описывают те части поверхностей отклика исследуемых параметров в фазовых пространствах варьироваемых факторов, о чём свидетельствуют данные таблицы 2.

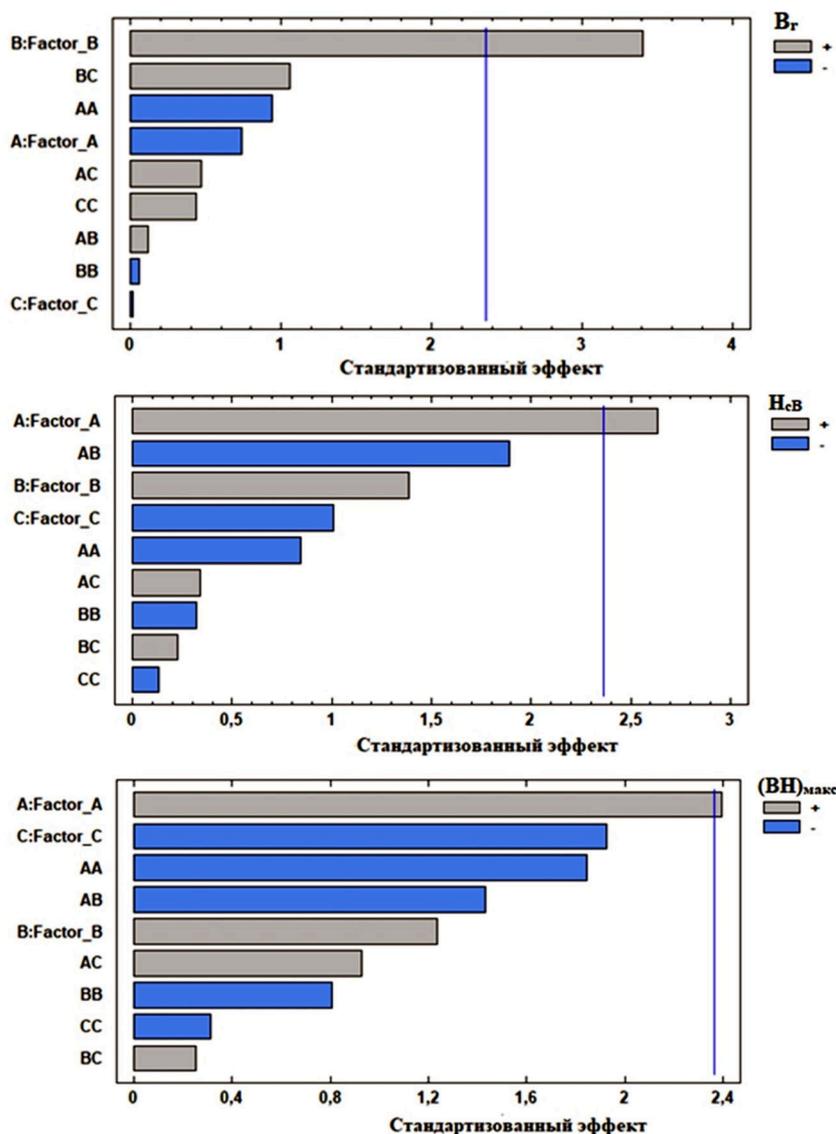


Рисунок 1 – Стандартизованные диаграммы Парето для остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы  $H_{cb}$  и максимального энергетического энергетического произведения  $(BH)_{max}$  от выбранных факторов варьирования

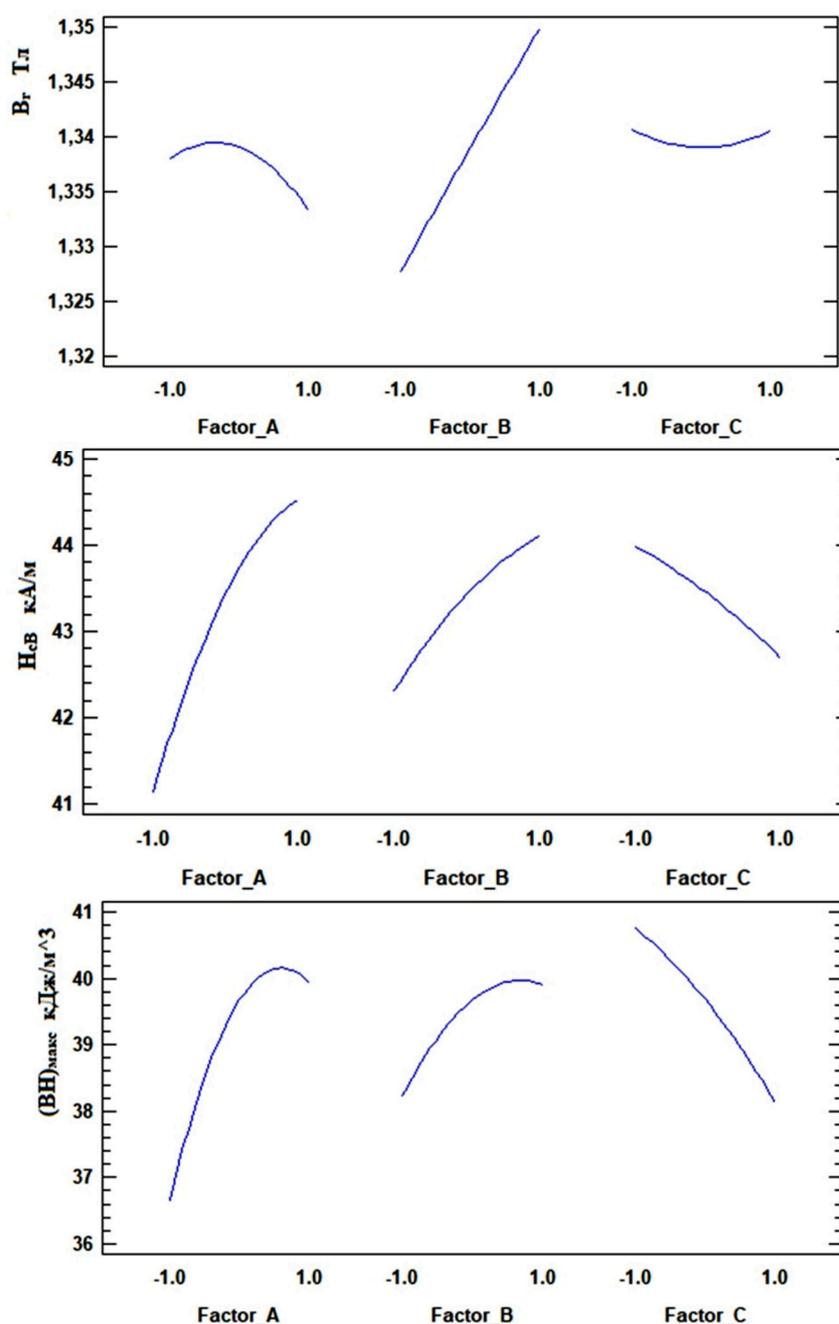
Таблица 2 – Экспериментальные и расчётные данные магнитных гистерезисных свойств порошкового сплава 27X10KM

№	Экспериментально полученные значения			Расчётные значения по уравнениям (1) – (3)		
	$B_r$ , Тл	$H_{cb}$ , кА/м	$(BH)_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	$B_r$ , Тл	$B_r$ , Тл	$(BH)_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>
1	1,35	44,5	40,1	1,34	43,4	39,7
2	1,34	42,5	40,6	1,34	43,4	39,7
3	1,33	43,0	38,2	1,34	43,4	39,6
4	1,32	43,9	37,2	1,32	44,6	38,5
5	1,326	41,3	35,1	1,33	38,9	33,0
6	1,31	44,6	39,8	1,32	41,3	36,5
7	1,33	43,0	37,4	1,34	42,1	36,8
8	1,36	44,8	40,4	1,35	43,4	38,4
9	1,33	35,3	29,5	1,32	37,2	31,3
10	1,34	36,8	33,5	1,34	39,4	36,0
11	1,35	44,2	40,6	1,35	44,0	39,8
12	1,34	44,4	40,2	1,34	43,7	38,9
13	1,36	41,9	35,7	1,35	42,5	36,0
14	1,33	44,9	40,0	1,33	45,4	40,2
15	1,34	45,05	41,4	1,34	44,3	41,2
16	1,35	42,7	36,9	1,36	44,3	39,4
17	1,33	42,95	37,5	1,32	44,3	38,8



Наглядную и полезную информацию влияния основных факторов на магнитные гистерезисные свойства исследуемого сплава дают графики (рис. 2), из которых отчётливо видно, что, если для повышения остаточной индукции  $B_r$  надо резко повышать фактор В относительно нулевой точки (факторы А и С имеют почти оптимальные значения), то для повышения коэрцитивной силы  $H_{св}$  надо повышать значение фактора А, а для достижения максимального энергетического произведения  $(BH)_{макс}$  следует понижать фактор С. В таблице 3 приведены оптимальные значения факторов А, В и С для получения оптимальных значений параметров  $B_r$ ,  $H_{св}$  и  $(BH)_{макс}$ .

По оптимальному режиму термической обработки сплава 27Х10КМ на получение оптимального значения  $(BH)_{макс}$ : закалка от 1100 °С в воде + ТМО (660 °С (10 мин) + охлаждение до 580 °С со скоростью  $V1 = 16$  °С/час) + охлаждение от 580 °С до 500 °С со скоростью  $V2 = 3,6$  °С/час + дополнительные отпуска в температурном интервале 500–460 °С были обработаны 6 штук образцов в одной партии. Полученные значения остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы  $H_{св}$  и максимального энергетического произведения  $(BH)_{макс}$  приведены в таблице 3.



**Рисунок 2** – Графические зависимости влияния основных факторов на остаточную индукцию  $B_r$ , коэрцитивную силу  $H_{св}$  и максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{макс}$  порошкового сплава 27Х10КМ (Fe-27Cr-10Co-1Mo)



**Таблица 3** – Оптимальные значения факторов А, В, С и оптимальные значения параметров  $B_r$ ,  $H_{CB}$ ,  $(BH)_{\text{макс}}$

Факторы	Параметры		
	$B_r$	$H_{CB}$	$(BH)_{\text{макс}}$
Фактор А	- 0,42	1,68	- 0,16
Фактор В	1,68	- 1,68	0,5
Фактор С	1,68	- 1,42	- 1,68
Расчётные оптимальные значения	1,37 Тл	47,4 кА/м	41,3 кДж/м <sup>3</sup>

Данные таблицы 3 показывают, что оптимальная термическая обработка магнитотвёрдого сплава 27Х15К10М действительно обеспечивает, во-первых, магнитные гистерезисные свойства несколько даже большие, чем дают расчёты программы Statgraphics, и, во-вторых, при экономии кобальта более 30 % по сравнению с промышленными сплавами 22Х15К и 25Х15КЮБФ (ГОСТ 24897-81) сплав имеет магнитные гистерезисные свойства на 15–20 % выше, чем у названных промышленных сплавов.

**Таблица 4** – Магнитные гистерезисные свойства сплава 27Х10КМ после проведения оптимальной термообработки

№ образца	$B_r$ , Тл	$H_{CB}$ , кА/м	$(BH)_{\text{макс}}$ , кДж/м <sup>3</sup>
1	1,36	45,0	42,0
2	1,36	45,1	42,0
3	1,37	45,3	42,2
4	1,37	45,4	44,0
5	1,36	45,1	42,6
6	1,39	45,0	45,0

**Выводы**

На порошковом магнитотвёрдом сплаве Fe-27Cr-10Co-1Mo после проведения оптимальной термической обработки на получение оптимального значения максимального энергетического произведения  $(BH)_{\text{макс}}$  получены: остаточная индукция  $B_r$  до 1,39 Тл, коэрцитивная сила  $H_{CB}$  свыше 45 кА/м и максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{\text{макс}}$  до 46 кДж/м<sup>3</sup>.

Статистическая обработка экспериментальных результатов, полученных после проведения различных термообработок, показала, что такие факторы как температура начала проведения ТМО, скорость охлаждения при проведении ТМО и скорость охлаждения от температуры конца ТМО до 500°С по-разному влияют на получение оптимальных значений остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы  $H_{CB}$  и максимального энергетического произведения  $(BH)_{\text{макс}}$ .

*Работа выполнялась по государственному заданию № 007-00129-18-00 при финансовой поддержке ФЦНТП-2017 по государственному контракту от 26.09.2017 г. № 14.579.21.0149.*

**Литература:**

1. Jin S., Chin G.Y. and Wonsiewicz B.C. A Low Cobalt Ternary Cr-Co-Fe Alloy for Telephone Receiver Magnet Use // IEEE Transactions on Magnetics. – 1980. – MAG-16. – № 1. – P. 139–146.
2. Green M.L., Sherwood R.C., Chin G.Y., Wernick J.H. and Bernardini J. Low cobalt CrCoFe and CrCoFe-X permanent magnet alloys // IEEE Transactions on Magnetics. – 1980. – MAG-16. – № 5. – P. 1053–1055.
3. Green M.L., Scherwood R.C., Wong C.C. Powder metallurgy proceeding of CrCoFe permanent magnet alloys containing 5–25 wt. % Co // Journal of Applied Physics. – 1982. – V. 53. – № 3. – P. 2398–2400.
4. Jin S. and Gayle N.V. Low-Cobalt Cr-Co-Fe Magnet Alloys Obtained by Slow Cooling under Magnetic Field // IEEE Transactions on Magnetics. – 1980. – MAG-16. – № 3. – P. 526–529.
5. Kaneko H., Inoue K. Magnetic alloys. US Patent № 3 806 336. April 23, 1974. Int. Cl. C22c 39/16; H01f 1/00., US. Cl. 75-122.
6. Влияние содержания молибдена на магнитные свойства сплава X30K15M(1-5)T. / Р.И. Малинина [и др.] // Сталь. – 2009. – № 8. – С. 80–83.
7. Магнитные свойства магнитотвёрдого сплава Fe-30Cr-21Co-3Mo в изотропном и анизотропном состояниях / И.М. Миляев [и др.] // Перспективные материалы. Специальный выпуск. – 2009. – № 6. – Ч. 1. – С. 359–361.
8. Szymura S., Sojka L. Structure and magnetic properties of Fe-Cr-Co-Mo alloy melted in open induction furnace // Metal Science. – 1979. – V. 13. – Iss. 5. – P. 320–321.
9. Ahmad Z., ul Haq A., Husain S.W., Abbas T. Magnetic properties of isotropic Fe-28Cr-15Co-3,5Mo permanent magnets with additives // Physica B. – 2002. – V. 321. – P. 54–59.
10. Sugimoto S., Honda J., Ohtani Y., Okada M. and Homma M. Improvements of the magnetic properties of equiaxed Fe-Cr-Co-Mo hard magnets by two-step thermomagnetic treatment // IEEE Transactions on Magnetics. – 1987. – MAG-23. – № 5. – P. 3193–3195.
11. Нахимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М. : Наука, 1965. – 340 с. (Программа Statgraphics Centurion XVI).



12. Мильяев И.М., Мильяев А.И., Юсупов В.С. О механизме формирования высококоэрцитивного состояния в наноструктурированных магнитотвёрдых сплавах систем Fe-Cr-Co и Fe-Ni-Al-Co-Cu // *Металлы*. – 2009. – № 3. – С. 83–66.

### References:

1. Jin S., Chin G.Y. and Wonsiewicz B.C. A Low Cobalt Ternary Cr-Co-Fe Alloy for Telephone Receiver Magnet Use // *IEEE Transactions on Magnetism*. – 1980. – MAG-16. – № 1. – P. 139–146.
2. Green M.L., Sherwood R.C., Chin G.Y., Wernick J.H. and Bernardini J. Low cobalt CrCoFe and CrCoFe-X permanent magnet alloys // *IEEE Transactions on Magnetism*. – 1980. – MAG-16. – № 5. – P. 1053–1055.
3. Green M.L., Scherwood R.C., Wong C.C. Powder metallurgy proceeding of CrCoFe permanent magnet alloys containing 5–25 wt. % Co // *Journal of Applied Physics*. – 1982. – V. 53. – № 3. – P. 2398–2400.
4. Jin S. and Gayle N.V. Low-Cobalt Cr-Co-Fe Magnet Alloys Obtained by Slow Cooling under Magnetic Field // *IEEE Transactions on Magnetism*. – 1980. – MAG-16. – № 3. – P. 526–529.
5. Kaneko H., Inoue K. Magnetic alloys. US Patent № 3 806 336. April 23, 1974. Int. Cl. C22c 39/16; H01f 1/00., US. Cl. 75-122.
6. Influence of content of molybdenum on magnetic properties of X30K15M(1-5)T alloy. / R.I. Malinina [etc.] // *Steel*. – 2009. – № 8. – P. 80–83.
7. Magnetic properties of magnetosolid Fe-30Cr-21Co-3Mo alloy in isotropic and anisotropic states / I.M. Milyaev [etc.] // *Perspective materials. Special release*. – 2009. – № 6. – Part. 1. – P. 359–361.
8. Szymura S., Sojka L. Structure and magnetic properties of Fe-Cr-Co-Mo alloy melted in open induction furnace // *Metal Science*. – 1979. – V. 13. – Iss. 5. – P. 320–321.
9. Ahmad Z., ul Haq A., Husain S.W., Abbas T. Magnetic properties of isotropic Fe-28Cr-15Co-3,5Mo permanent magnets with additives // *Physica B*. – 2002. – V. 321. – P. 54–59.
10. Sugimoto S., Honda J., Ohtani Y., Okada M. and Homma M. Improvements of the magnetic properties of equiaxed Fe-Cr-Co-Mo hard magnets by two-step thermomagnetic treatment // *IEEE Transactions on Magnetism*. – 1987. – MAG-23. – № 5. – P. 3193–3195.
11. Nalimov V.V., Chernova N.A. Statistical methods of planning of extreme experiments. – M. : Science, 1965. – 340 p. (Statgraphics Centurion XVI program).
12. Milyaev I.M., Milyaev A.I., Yusupov V.S. About the mechanism of formation of a high-coercive state in the nanostructured magnetosolid alloys of the Fe-Cr-Co and Fe-Ni-Al-Co-Cu systems // *Metals*. – 2009. – № 3. – P. 83–66.