

**Татьяна Алексеевна Вомпе<sup>1</sup>,**

*аспирант, младший научный сотрудник,*

*Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН*

*(119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 49),*

*e-mail: tvompe@gmail.com*

**Алексей Сергеевич Устюхин,**

*инженер-исследователь,*

*Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН*

*(119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 49),*

*e-mail: fcbneo@yandex.ru*

**Игорь Матвеевич Миляев,**

*доктор технических наук,*

*Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН,*

*(119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 49),*

*e-mail: imilyaev@mail.ru*

**Виктор Александрович Зеленский,**

*кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник,*

*Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН*

*(119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 49),*

*e-mail: zelensky55@bk.ru*

### **Влияние режимов термоманитной обработки на магнитные гистерезисные свойства магнитотвердых порошковых Fe-Cr-Co сплавов с содержанием кобальта 12 и 16 масс. %<sup>2</sup>**

В работе методом порошковой металлургии получали магнитотвердые Fe-Cr-Co сплавы с содержанием кобальта 12 и 16 масс. %. В качестве легирующих добавок использовались молибден и кремний. Вакуумное спекание этих сплавов при температуре 1420 °С позволяет получать заготовки с относительной плотностью 96,5–98,5 %. Сравнение магнитных гистерезисных свойств сплавов Fe-26 % Cr-16 % Co-2 % Mo-0,5 % Si и Fe-26 % Cr-12 % Co-3 % Mo-0,5 % Si показало, что сплав с содержанием кобальта 16 масс. % обладает большей коэрцитивной силой, в то время как сплав с содержанием кобальта 12 масс. % – более высокой остаточной индукцией. Установлено, что магнитные гистерезисные свойства зависят от температуры начала обработки и скорости охлаждения сплава в магнитном поле. При определенных параметрах термообработки на сплаве с содержанием кобальта 12 масс. % можно добиться уровня магнитных гистерезисных свойств, сопоставимого со стандартами для сплавов с содержанием кобальта 15–16 масс. %. Использование сплавов с пониженным содержанием кобальта позволяет снизить экономические издержки при производстве постоянных магнитов и роторов гистерезисных электродвигателей.

**Ключевые слова:** магнитные свойства, магнитотвердые сплавы, коэрцитивная сила, остаточная индукция, термическая обработка

<sup>1</sup>Т. А. Вомпе – основной автор, его вклад включает в себя подготовку и спекание образцов, проведение термической обработки и анализ экспериментальных данных по магнитным гистерезисным свойствам.

<sup>2</sup>Грант РФФИ 15-03-04769-а.

**Tatiana A. Vompe**<sup>1</sup>,  
Postgraduate Student, Junior Researcher,  
Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science,  
Russian Academy of Sciences  
(49 Leninsky pr., Moscow, 119991, Russia),  
e-mail: tvompe@gmail.com

**Aleksey S. Ustyukhin**,  
Research Engineer,  
Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science,  
Russian Academy of Sciences  
(49 Leninsky pr., Moscow, 119991, Russia),  
e-mail: fcbneo@yandex.ru

**Igor M. Milyaev**,  
Doctor of Engineering Sciences,  
Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science,  
Russian Academy of Sciences  
(49 Leninsky pr., Moscow, 119991, Russia),  
e-mail: imilyaev@mail.ru

**Victor A. Zelensky**,  
Candidate of Physics and Mathematics, Leading Researcher,  
Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science,  
Russian Academy of Sciences  
(49 Leninsky pr., Moscow, 119991, Russia),  
e-mail: zelensky55@bk.ru

### The Effect of Thermomagnetic Treatment Conditions on Magnetic Hysteresis Properties of Fe-Cr-Co Hard Magnetic Powder Alloys with 12 and 16 wt. % Cobalt<sup>2</sup>

In the present work, hard magnetic Fe-Cr-Co alloys containing 12 and 16 wt. % cobalt were obtained by powder metallurgy method. Molybdenum and silicon were used as alloying additives. Vacuum sintering of this alloys allows us to obtain specimens with relative density 96.5–98.5 %. Comparison of magnetic hysteresis properties of Fe-26 % Cr-16 % Co-2 % Mo-0,5 % Si and Fe-26 % Cr-12 % Co-3 % Mo-0,5 % Si alloys indicated that alloy with 16 wt. % cobalt content usually has a higher coercivity, while alloy with 12 wt. % cobalt content has a higher residual induction. It was found that magnetic hysteresis properties depend on treatment start temperature and cooling rate in a magnetic field. It is possible under certain settings of thermal treatment to obtain an alloy containing 12 wt. % cobalt magnetic hysteresis properties comparable to standards for alloys with 15–16 wt. cobalt. Using alloys with low cobalt content will reduce the economic cost production of permanent magnets and rotors for hysteresis motors.

**Keywords:** magnetic properties, hard magnetic alloys, coercive force, residual induction, heat treatment

**Введение.** Сплавы системы Fe-Cr-Co относятся к классу деформируемых дисперсионно-твердеющих материалов [1]. Их используют в машиностроении и приборостроении для изготовления различных конструкционных деталей, от которых

---

<sup>1</sup>T. A. Vompe is the main author, her contribution includes the preparation and sintering of samples, conducting heat treatment and analysis of experimental data on the magnetic hysteresis properties.

<sup>2</sup>Grant RFBR 15-03-04769-a.

требуется сочетание высоких механических и магнитных свойств, например, дисковых роторов высокоскоростных гистерезисных двигателей со скоростями вращения порядка 100–150 тыс. оборотов в минуту [2], магнитных колец гироскопов, высокочувствительных сенсоров, датчиков, которые применяются в электронной промышленности, автомобильной технике, морских приборах, авиационно-космических приборах, при разведке и разработке нефтяных месторождений, поисковых устройствах и т. д. [3–5]. Применение Fe-Cr-Co сплавов охватывает широкий спектр отраслей промышленности. Однако, из-за более низких магнитных гистерезисных свойств (коэрцитивная сила  $H_c$  и максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{max}$ ) по сравнению с остальными классами магнитотвердых материалов предпочтение к сплаву Fe-Cr-Co отдается преимущественно при изготовлении малогабаритных магнитов сложной формы, а также в случаях, когда необходима работа устройства в экстремальных условиях с точки зрения механических нагрузок или коррозии, либо требуется сочетание длительной и стабильной работы с приемлемой ценой изделия. Кроме того, мировые производители постоянных магнитов из сплавов системы Fe-Cr-Co используют исключительно технологию плавки и литья при получении заготовок, в то время как порошковая металлургия является более производительным и экономичным способом производства постоянных магнитов. Для других классов магнитотвердых материалов (системы Nd-Fe-B, Sm-Co) технология порошковой металлургии используется давно и часто является единственно возможным способом их получения. То же самое касается и наиболее близких по характеристикам к системе Fe-Cr-Co сплавов ЮНДК, где порошковая металлургия активно применяется наряду с технологией плавки и литья для получения постоянных магнитов.

Для сплавов системы Fe-Cr-Co, порошковый подход был применен относительно недавно [6; 7], однако установлены некоторые ограничения. В частности, основным способом увеличения плотности является спекание при высоких температурах (около 1400 °С, в то время как для сплавов ЮНДК не выше 1300 °С). Относительно недавно появились исследования [8–11], в которых указывалось, что отдельные Fe-Cr-Co сплавы хорошо спекаются и при температурах 1300–1350 °С, при этом имеют хорошие магнитные и механические свойства. Еще одним способом снижения экономических издержек при производстве постоянных магнитов из Fe-Cr-Co сплавов является использование сплавов с более низким содержанием кобальта (менее 15 масс. %).

Термическая обработка является ключевым этапом при изготовлении постоянных магнитов из рассматриваемых сплавов, так как именно на этой стадии происходит формирование необходимого уровня магнитных свойств. Варьированием параметров термической обработки, таких как температура начала распада, скорость охлаждения в магнитном поле, время выдержки при дополнительной термической обработке и т.д., можно добиться в рамках одного состава различных значений коэрцитивной силы и остаточной индукции.

Целью данной работы было исследование влияния режимов термомагнитной обработки магнитотвердых порошковых Fe-Cr-Co сплавов с различным содержанием кобальта.

**Методика эксперимента.** Для исследования выбраны сплавы со средним и низким содержанием кобальта, химический состав приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплавов исследованных в работе

№ сплава	Содержание элементов, масс. %				
	Fe	Cr	Co	Mo	Si
1	55,5	26,0	16,0	2,0	0,5
2	58,5	26,0	12,0	3,0	0,5

Образцы изготовлены методом порошковой металлургии. Были использованы промышленные высокочистые порошки железа (марки ВС), хрома (ПХС-1), кобальта (ПК-1Н), и добавки порошка молибдена и кремния с размером частиц менее 40 мкм. Порошки смешивали в турбулентном смесителе С 2.0 «Турбула». Компактирование осуществляли холодным способом путем одностороннего прессования на ручном прессе KNUTH-HP15 с использованием стеарата цинка в разъемной матрице с внутренним диаметром 13,6 мм при давлении 600 МПа. Спекание спрессованных образцов проводили в течение 2,5 часов при температуре 1420 °С в шахтной печи СШВ-1,25/24-И1 в вакууме 10–2 Па. Сырые прессовки имели относительную плотность 77,0–79,5 %, а образцы после спекания – 96,5–98,5 %. Магнитные гистерезисные свойства сплавов ( $B_r$ ,  $H_c$ ,  $(BH)_{max}$ ) измеряли на гистерезисграфе Permagraph L EP-3. Погрешность измерений коэрцитивной силы  $H_c$  и остаточной индукции  $B_r$  составляла 3 %, магнитного произведения  $(BH)_{max}$  – 6 %. На всех исследуемых образцах проводили термическую обработку (для получения высококоэрцитивного состояния), которая включала в себя закалку в воде от 1250 °С, нагрев выше температуры начала спинодального распада  $\alpha$ -твердого раствора 700–720 °С и охлаждение в поле более 3000 Э от температуры  $T_2$  до температуры 600 °С со скоростью  $v_1$ . Охлаждение до температуры 500 °С проводили без поля со скоростью 8 °С/ч. Оптимизацию режимов обработки проводили методом планирования эксперимента. Обработку результатов оптимизации – в программах Statgraphics Plus 5.0 и Statistica 10.0. Матрица планирования эксперимента была выбрана в виде композиционного плана 2 плюс звездные точки. В табл. 2 приведены уровни варьирования выбранных факторов.

Таблица 2

Название факторов и уровни их варьирования

Факторы	Обозначения	Ед. изм.	Уровни факторов		
			40	60	80
$V_1$	A	°С/ч			
$T_2$	B	°С	640	660	680

**Результаты исследований и их обсуждение.** В результате проведения различных режимов ТМО для сплава Fe-26 % Cr-12 % Co-3 % Mo-0,5 % Si были построены поверхности отклика и поперечные сечения этих поверхностей в соответствующих фазовых пространствах (рис. 1). На рисунке видно, какая ТМО обеспечивает получение максимальных магнитных гистерезисных свойств на сплаве. В результате обработки, где  $v_1 = 80$  °С/ч,  $T_2 = 680$  °С были получены максимальные свойства:  $B_r = 1,22$  Тл,  $H_c = 45,0$  кА/м,  $(BH)_{max} = 29,9$  кДж/м<sup>3</sup>, коэффициент выпуклости кривой размагничивания  $\mu = 0,54$ , а максимальное значение остаточной индукции  $B_r = 1,25$  Тл было получено в результате обработки при  $v_1 = 60$  °С/ч,  $T_2 = 688$  °С. При повышении скорости охлаждения  $v_1$  до 90 °С/ч и температуры начала обработки в магнитном поле  $T_2$  до 690 °С на сплаве Fe-26 % Cr-12 % Co-3 % Mo-0,5 % Si можно получить значения коэрцитивной силы  $H_c$  до 50 кА/м. Сравнение различных параметров порошковых магнитотвердых Fe-Cr-Co сплавов исследованных в работе представлено в табл. 3.

Таблица 3

Магнитные гистерезисные свойства исследованных сплавов

№ сплава	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Отн. пл-ть, %	$B_r$ , Тл	$H_c$ , кА/м	$(BH)_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>
1	7,71–7,76	97,5–98,5	1,15–1,21	44,0–54,0	24,5–30,0
2	7,59–7,75	96,5–98,5	1,21–1,25	33,0–45,0	20,0–29,9

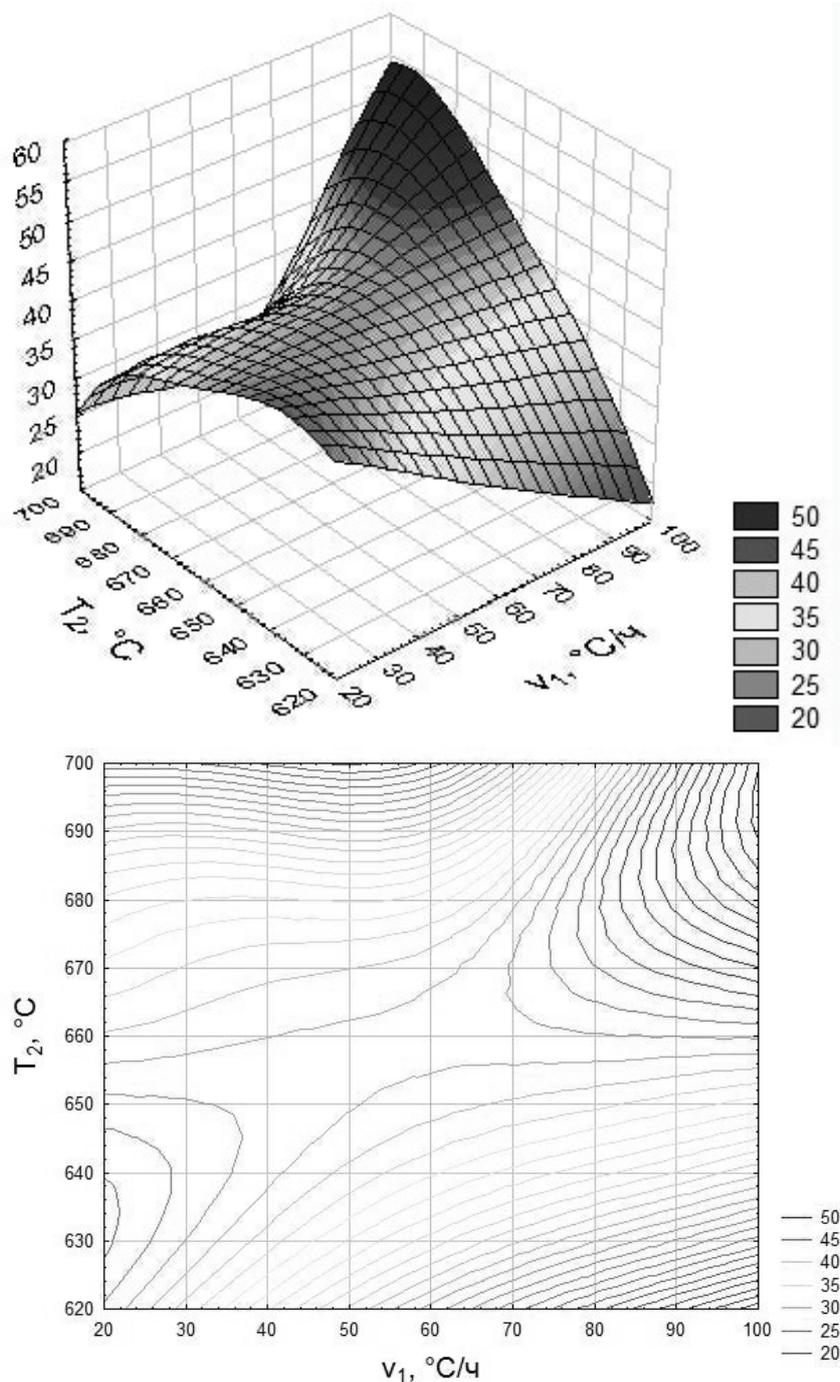


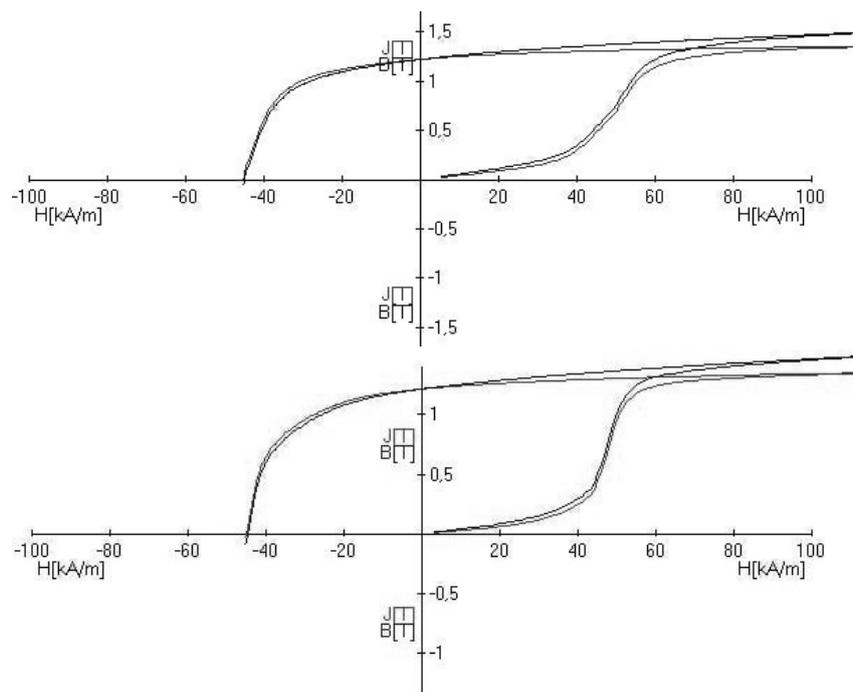
Рис. 1. Поверхность отклика (а) и поперечные сечения поверхности коэрцитивной силы (б) для сплава Fe-26 % Cr-12 % Co-3 % Mo-0,5 % Si

Таблица 3

Магнитные гистерезисные свойства исследованных сплавов

№ сплава	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Отн. пл-ть, %	Вг, Тл	Нс, кА/м	(ВН)max, кДж/м <sup>3</sup>
1	7,71–7,76	97,5–98,5	1,15–1,21	44,0–54,0	24,5–30,0
2	7,59–7,75	96,5–98,5	1,21–1,25	33,0–45,0	20,0–29,9

В табл. 4 приведены параметры ТМО, в результате которых были получены максимальные значения магнитных гистерезисных свойств. Петли гистерезиса для исследованных сплавов показаны на рис. 2.



**Рис. 2.** Петли гистерезиса: а – для сплава Fe-26 % Cr-12 % Co-3 % Mo-0,5 % Si, обработка № 1, б – для сплава Fe-26 % Cr-16 % Co-2 % Mo-0,5 % Si, обработка № 3

Таблица 4

Максимальные магнитные гистерезисные свойства сплава Fe-26 % Cr-12 % Co-3 % Mo-0,5 % Si и Fe-26 % Cr-16 % Co-2 % Mo-0,5 % Si, полученные после разных термических обработок

№ обработки	№ сплава	V1, °CAi	T2, °C	B <sub>r</sub> , Тл	H <sub>c</sub> , кА/м	(BH) <sub>max</sub> , кДж/м	Ч
1	2	80	680	1,22 ± 0,04	45,0 ± 1,4	29,9 ± 0,9	0,54
2	2	60	688	1,25 ± 0,04	33,0 ± 1,0	20,4 ± 0,6	0,49
3	1	150	640	1,21 ± 0,04	44,5 ± 1,3	28,2 ± 0,8	0,52
4	1	100	640	1,17 ± 0,04	54,0 ± 1,6	30,0 ± 0,9	0,47

Коэффициенты выпуклости кривой размагничивания практически одинаковы, поскольку магнитные гистерезисные свойства сплавов сопоставимы в пределах ошибки измерения. Из данных табл. 3 и 4 видно, что содержание кобальта в Fe-Cr-Co сплаве заметно влияет на уровень коэрцитивной силы H<sub>c</sub>. На данных сплавах благодаря применению различных обработок можно достичь требуемого для потребителя уровня свойств, например, для применения сплавов в качестве материала для постоянных магнитов (не менее 40 кА/м) или для производства роторов гистерезисных электродвигателей (менее 20 кА/м).

**Выводы.** Установленные режимы термической обработки позволили получить на порошковом магнитотвердом сплаве Fe-26 % Cr-12 % Co-3 % Mo-0,5 % Si коэрцитивную силу H<sub>c</sub> до 45 кА/м, остаточную индукцию B<sub>r</sub> до 1,25 Тл и максимальное энергетическое произведение (BH)<sub>max</sub> до 29,9 кДж/м, а на сплаве Fe-26 % Cr-16 % Co-2 % Mo-0,5 % Si до 54 кА/м, B<sub>r</sub> до 1,21 Тл и (BH)<sub>max</sub> до 30 кДж/м. Показано, что магнитные свойства зависят от температуры начала обработки и скорости охлаждения сплава в магнитном поле. Исследованные сплавы Fe-26 % Cr-12 % Co-3 % Mo-0,5 % Si и Fe-26 % Cr-16 % Co-2 % Mo-0,5 % Si по уровню магнитных гистерезисных свойств могут найти применение как в качестве материалов для изготовления постоянных магнитов, так и в производстве роторов гистерезисных электродвигателей. Применение сплава с более низким содержанием кобальта позволит снизить экономические издержки при производстве.

*Список литературы*

1. Сергеев В. В., Булыгина Т. И. Магнитотвердые материалы. М.: Энергия, 1980. 224 с.
2. Artamonov E. V., Libman M. A., and Rudanovskii N. N. Magnetically Hard Materials for the Motors of Synchronous Hysteresis Electric Motors // Steel in Translation, 2007. Vol. 37, No 6. P. 547–551.
3. Гидродинамический гироскоп 2310163: пат. Рос. Федерация. № 2006132884/28: заявл. 14.09.06: опубл. 10.11.07. 11 с.
4. Либман М. А. Магнитотвердые сплавы на основе системы Железо–Хром–Кобальт // Материаловедение. 2010. № 9. С. 58–64.
5. YUMagnetics [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://smi-mag.com/FeCrComagnets.html> (дата обращения: 11.05.2016).
6. Ряпосов И. В., Шацов А. А. Особенности легирования, структура и свойства порошкового магнитотвердого сплава с повышенными эксплуатационными характеристиками // Перспективные материалы. 2009. № 1. С. 57–61.
7. Green M. L., Sherwood R. C., Wong C. C. Powder metallurgy processing of CrCoFe permanent magnet alloys containing 5-25 wt. % Co // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, No 3. P. 2398–2400.
8. Алымов М. И., Анкудинов А. Б., Зеленский В. А., Миляев И. М., Юсупов В. С., Устюхин А. С. Влияние легирования и режима спекания на магнитные гистерезисные свойства Fe-Cr-Co порошкового сплава // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 3. С. 34–38.
9. Алымов М. И., Анкудинов А. Б., Зеленский В. А., Миляев И. М., Юсупов В. С., Вомпе Т. А. Влияние поверхностно-активных добавок при помоле на процессы прессования, спекания и магнитные свойства порошкового сплава FeCrCoMoW // Перспективные материалы. 2014. № 4. С. 51–57.
10. Устюхин А. С., Алымов М. И., Миляев И. М. Магнитные гистерезисные свойства Fe-26Cr-16Co порошковых магнитотвердых сплавов // Письма о материалах. 2014. Т. 4, № 1. С. 59–61.
11. Устюхин А. С., Вомпе Т. А., Миляев И. М., Зеленский В. А. Исследование магнитных гистерезисных свойств Fe-26Cr-16Co порошковых сплавов в зависимости от условий спекания и термообработки // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2015. № 3. С. 112–119.

*References*

1. Sergeev V. V., Bulygina T. I. Magnitotverdye materialy. M.: Energiya, 1980. 224 s.
2. Artamonov E. V., Libman M. A., and Rudanovskii N. N. Magnetically Hard Materials for the Motors of Synchronous Hysteresis Electric Motors // Steel in Translation, 2007. Vol. 37, No 6. P. 547–551.
3. Gidrodinamicheskii giroskop: 2310163 pat. Ros. Federatsiya. № 2006132884/28: zayavl. 14.09.06: opubl. 10.11.07. 11 s.

4. Libman M. A. Magnitotverdye splavy na osnove sistemy Zhelezo–Khrom–Kobal't // Materialovedenie. 2010. № 9. S. 58–64.
5. YYMagnetics [Elektronnyi resurs] Rezhim dostupa: <http://smi-mag.com/FeCrComagnets.html> (data obrashcheniya: 11.05.2016).
6. Ryaposov I. V., Shatsov A. A. Osobennosti legirovaniya, struktura i svoystva poroshkovogo magnitotverdого сплава s povyshennymi ekspluatatsionnymi kharakteristikami // Perspektivnye materialy. 2009. No 1. С. 57–61.
7. Green M. L., Sherwood R. C., Wong C. C. Powder metallurgy processing of CrCoFe permanent magnet alloys containing 5-25 wt. % Co // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, №.3. P. 2398–2400.
8. Alymov M. I., Ankudinov A. B., Zelenskii V. A., Milyaev I. M., Yusupov V. S., Ustyukhin A. S. Vliyanie legirovaniya i rezhima spekaniya na magnitnye gisterezisnye svoystva Fe-Cr-Co poroshkovogo сплава // Fizika i khimiya obrabotki materialov. 2011. № 3. С. 34-38.
9. Alymov M. I., Ankudinov A. B., Zelenskii V. A., Milyaev I. M., Yusupov V. S., Vompe T. A. Vliyanie poverkhnostno-aktivnykh dobavok pri pomole na protsessy pressovaniya, spekaniya i magnitnye svoystva poroshkovogo сплава FeCrCoMoW // Perspektivnye materialy. 2014. № 4. С. 51–57.
10. Ustyukhin A. S., Alymov M. I., Milyaev I. M. Magnitnye gisterezisnye svoystva Fe-26Cr-16Co poroshkovykh magnitotverdyykh сплавов // Pis'ma o materialakh. 2014. Т. 4, № 1. С. 59–61.
11. Ustyukhin A. S., Vompe T. A., Milyaev I. M., Zelenskii V. A. Issledovanie magnitnykh gisterezisnykh svoystv Fe-26Cr-16Co poroshkovykh сплавов v zavisimosti ot uslovii spekaniya i termoobrabotki // Uchenye zapiski Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Fizika, matematika, tekhnika, tekhnologiya. 2015. № 3. С. 112–119.

---

**Библиографическое описание статьи**

*Vompe T. A., Ustyukhin A. S., Milyaev I. M., Zelenskiy V. A.* Влияние режимов термомагнитной обработки на магнитные гистерезисные свойства магнитотвердых порошковых Fe-Cr-Co сплавов с содержанием кобальта 12 и 16 масс. % // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2016. Т. 11, № 3. С. 77–84.  
DOI:10.21209/2308-8761-2016-11-4-77-84.

**Reference to article**

*Vompe T.A., Ustyukhin A. S., Milyaev I. M., Zelenskiy V. A.* The Effect of Thermomagnetic Treatment Conditions on Magnetic Hysteresis Properties of Fe-Cr-Co Hard Magnetic Powder Alloys with 12 and 16 wt. % cobalt Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2016. Vol. 11, No 4. P. 77–84.  
DOI:10.21209/2308-8761-2016-11-4-77-84.

---

*Статья поступила в редакцию 20.04.2016*