

Мариева М.А., Козвонин В.А., Шацов А.А. Повышение прямоугольности петли магнитного гистерезиса магнитотвердого сплава на основе системы Fe–Cr–Co за счет легирования Sm // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 39–46. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.04

Marieva M.A., Kozvoin V.A., Shatsov A.A. Increasing the rectangularity of the loop of magnetic hysteresis of magnetic hysteresis based on the Fe–Cr–Co system due to the alloying Sm. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 39–46. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.04

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 23, № 3, 2021**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.04

УДК 669.018.58

**М.А. Мариева<sup>1</sup>, В.А. Козвонин<sup>2</sup>, А.А. Шацов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

<sup>2</sup>ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия

**ПОВЫШЕНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНОСТИ ПЕТЛИ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА  
МАГНИТОТВЕРДОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Fe–Cr–Co  
ЗА СЧЕТ ЛЕГИРОВАНИЯ Sm**

В последние десятилетия перед учеными ставится важная задача разработки материалов, сочетающих в себе уникальные свойства. Например, материалы с рекордными значениями твердости и прочности, обладающие высокой жаропрочностью, износостойкостью, твердостью, заданными стабильными магнитными свойствами. Острой проблемой в нашей стране также является установление правильного соотношения между ресурсодобывающими, перерабатывающими и потребляющими отраслями промышленности. Ввиду этого широкое применение находят ресурсосберегающие технологии. Порошковая металлургия позволяет вести почти безотходное производство, сокращает трудовые затраты за счет уменьшения количества технологических операций.

Сплавы системы Fe–Cr–Co, полученные с помощью методов ПМ, сочетают в себе высокие магнитные свойства, коррозионную стойкость, прочность, пластичность, при относительно низкой стоимости, тем самым представляют большой интерес для исследователей. Для повышения магнитных гистерезисных свойств (коэрцитивной силы, магнитной индукции, магнитной энергии и коэффициента прямоугольности петли магнитного гистерезиса ( $K_n$ )) сплавы системы Fe–Cr–Co легируют различными элементами. Доказан положительный эффект введения Si, Mo, Nb, Al. Влияние самария остается неизученным.

Исследован магнитотвердый порошковый сплав 22Х15К4МС, легированный самарием, после закалки и ступенчатого старения. Заготовки получены методом холодного прессования при давлении 600 МПа и последующим спеканием в вакууме. Целью работы являлось определение оптимального содержания самария в порошковом сплаве 22Х15К4МС, оказывающее положительный эффект на основные магнитные характеристики и прямоугольность петли магнитного гистерезиса. Определено оптимальное содержание самария, обеспечивающее сочетание высокой коэрцитивной силы, остаточной индукции и  $K_n$  при удовлетворительной плотности. Определены температурно-временные параметры старения образцов, обеспечивающие получение максимальных магнитных свойств.

**Ключевые слова:** Fe–Cr–Co, гистерезисный сплав, порошковый сплав, жидкофазное спекание, магнитотвердый сплав, коэрцитивная сила, магнитная индукция, прямоугольность петли магнитного гистерезиса, Sm–Co, ступенчатое старение, ротор гистерезисного двигателя.

M.A. Marieva<sup>1</sup>, V.A. Kozvonin<sup>2</sup>, A.A. Shatsov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>PJSC "Perm Scientific and Production Instrument-Making Company", Perm, Russian Federation

## INCREASING THE RECTANGULARITY OF THE LOOP OF MAGNETIC HYSTERESIS OF MAGNETIC HYSTERESIS BASED ON THE FE–CR–CO SYSTEM DUE TO THE ALLOYING SM

In recent decades, scientists have been faced with the important task of developing materials that combine unique properties. For example, materials with record values of hardness and strength, possessing high heat resistance, wear resistance, hardness, specified stable magnetic properties. An acute problem in our country is also establishing the right balance between resource-extracting, processing and consuming industries. Therefore, resource-saving technologies such as powder metallurgy (PM) are widely used. The use of PM methods allows for almost waste-free production, reduces labor costs by reducing the number of technological operations.

Alloys of the Fe-Cr-Co system, obtained using PM methods, combine high magnetic properties, corrosion resistance, strength, ductility, at a relatively low cost, thereby being of great interest to researchers. To increase the magnetic hysteresis properties (coercive force, magnetic induction, magnetic energy and squareness coefficient of the magnetic hysteresis loop ( $K_p$ )), the alloys of the Fe-Cr-Co system are doped with various elements. The positive effect of the introduction of Si, Mo, Nb, Al has been proven. The influence of samarium remains unexplored.

In this work, we investigated a hard magnetic powder alloy 22Kh15K4MS doped with samarium after quenching and stepwise aging. Cold pressing at a pressure of 600 MPa and subsequent sintering in vacuum obtained billets. The aim of the work was to determine the optimal content of samarium in the powder alloy 22Kh15K4MS, which has a positive effect on the main magnetic characteristics and the squareness of the magnetic hysteresis loop. The optimal content of samarium was determined, providing a combination of high coercive force, residual induction and  $K_p$  at a satisfactory density. The temperature-time parameters of the aging of the samples were determined, which ensure the obtaining of the maximum magnetic properties.

**Keywords:** Fe–Cr–Co, hysteresis alloy, powder alloy, liquid-phase sintering, hard magnetic alloy, coercive force, magnetic induction, squareness of the magnetic hysteresis loop, Sm–Co, step aging, hysteresis motor rotor.

Получение материалов с уникальными свойствами [1, 2] методами порошковой металлургии является перспективным направлением развития в современном мире [3]. Актуальной задачей машиностроения является поиск новых магнитотвердых материалов, сочетающих высокие гистерезисные и прочностные свойства с низкой стоимостью [4]. В последнее время прогресс в исследованиях магнитотвердых материалов сосредоточен на альтернативных системах легирования, не содержащих большого количества легирующих элементов. Высокие свойства магнитов систем Nd–Fe–B ( $(BH)_{\max}$  до 50 МГсЭ), Sm–Fe–N и SmCo ( $(BH)_{\max}$  до 24 МГсЭ) [5] достигаются ценой дорогостоящей добычи и переработки редкоземельных элементов, импортных обязательств и экологических ограничений при их производстве [6–8]. Большой интерес для исследователей представляет класс магнитотвердых материалов системы Fe–Cr–Co [9,10]. Он позволяет достигать следующих свойств:  $(BH)_{\max} = 32,4$  кДж / м<sup>3</sup>,  $B_r = 1,15$  Тл и  $H_c = 52,9$  кА/м. Сплавы Fe–Cr–Co демонстрируют превосходную температурную стабильность, хорошую коррозионную стойкость, высокую температуру Кюри (680 °С), низкий температурный коэффициент магнитной индукции (0,0128 % / С), высокую пластичность и меньшую стоимость производства при удовлетворительных магнитных характеристиках, в сравнении с магнитотвердыми материалами из редкоземельных металлов [8, 11]. Варьированием параметров термической обработки и приложением внешнего магнитного поля для сплава одного химического состава можно добиться широкого

спектра сочетаний основных магнитных характеристик [12]. Это делает сплавы системы Fe–Cr–Co востребованными при производстве деталей с высокими магнитными и механическими свойствами, например роторов гистерезисных двигателей со скоростями вращения от 100 тыс. до 1 млн об. / мин [13, 14], а также высокочувствительных датчиков, магнитных колец гироскопов, морских и авиационных навигационных систем, поисковых устройств [15, 16].

Широкое применение в автоматике, прецизионных системах слежения и производстве динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ) [17, 18] находят синхронные гистерезисные двигатели (СГД) [19]. СГД отличается простотой конструкции, отсутствием потерь на возбуждение и высокой стабильностью скорости ротора [20]. Для производства синхронных двигателей, используемых в составе навигационных систем, широко применяют гистерезисные магниты системы Fe–Cr–Co [21]. Основными контролируемыми характеристиками гистерезисных магнитов являются: коэрцитивная сила  $H_c$ , магнитная индукция  $B_r$ , магнитная энергия  $(BH)_{\max}$  и коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса  $K_p$ .  $K_p$  чаще всего используется при характеристике магнитных материалов специализированного назначения, например для ферритов, используемых в устройствах автоматики, вычислительной техники [22]. Коэффициент прямоугольности петли гистерезиса представляет собой отношение остаточной индукции  $B_r$  к максимальной индукции  $B_{\max}$ :

$$K_{II} = \frac{B_r}{B_{max}} \cdot 1.$$

Чем ближе  $K_{II}$  к единице, тем быстрее происходит перемагничивание из состояния с остаточной индукцией в противоположное состояние с максимальной индукцией [23].

Применение системы Fe–Cr–Co в качестве гистерезисных материалов позволяет ротору синхронного гистерезисного двигателя находиться на петлях гистерезиса с большими значениями индукции и напряженности поля, дает возможность использовать двигатель при больших значениях нагрузки. Кроме того, использование сплавов системы Fe–Cr–Co позволяет повысить в несколько раз электромагнитную мощность при пуске и пусковой момент при снижении времени разбега [21].

Авторы работы [24] установили, при легировании системы Fe–Cr–Co самарием происходит рост магнитных характеристик литого сплава 45–xFe–28Cr–20Co–3Mo–2V–2Ti–xSm. Так, с увеличением содержания Sm от 0 до 2,0 мас. %  $BH_{(max)}$  повышается на 86 %,  $B_r$  на 47 % и  $H_c$  на 28,7 %. Таким образом, легирование системы Fe–Cr–Co–Mo–V–Ti самарием позволяет существенно повысить основные магнитные характеристики сплава. Роль самария в гистерезисных и экономно-легированных сплавах остается неизученной. Кроме того, оптимальное содержание самария и эффект, производимый на порошковые аналоги системы Fe–Cr–Co, могут существенно отличаться от литых и деформируемых сплавов.

### Методика исследований

В работе исследовали порошковый магнитотвердый сплав 22X15K4MC для гистерезисных магнитов. Влияние самария на магнитные характеристики сплава определяли при концентрациях 0,3; 0,4; 0,5 и 0,6 мас. % (табл. 1).

В качестве исходных компонентов шихты использовали порошки металлов и сплавов: хром ПХ-1С, ТУ 14-5-298–99; кобальт ГП-ОК ТУ 1793-008–92; железо ОСЧ 6-2, ТУ 6-09-05808008-262–92; феррокремний ФС50, ГОСТ 1415–93; молибден МПЧ, ТУ 48-19-69–80; самарий-кобальт, ГОСТ 21559–76.

Шихту просеивали через сетку с размером ячейки 63 мкм и усредняли в смесителе со смещенной осью вращения в течение 8 ч. Заготовки прессовали в закрытых стальных пресс-формах при давлении 600 МПа. Прессовки спекали в вакууме  $10^{-2}$  Па в течение 2 ч.

В качестве опытных образцов использовали тороиды с формой и размерами, близкими к серийным деталям.

Таблица 1

Химический состав опытных сплавов

Номер плавки	Содержание элемента, %					
	Fe	Cr	Co	Mo	Si	Sm
1	56,2	22,5	15	4	1	1,3
2	55,76					1,74
3	55,33					2,17
4	54,89					2,61

Плотность образцов после спекания определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 25281–82.

Термическая обработка заготовок образцов включала закалку от 1250 °С в 15%-ном водном растворе NaCl и многоступенчатое старение (табл. 2). В закаленном состоянии заготовки образцов были пластичными и имели твердость в интервале 20–25 HRC.

Основные магнитные свойства и форму петли магнитного гистерезиса опытных образцов определяли на гистерезисграфе Permagraph L с программным обеспечением PERMA. Структуру магнитных образцов исследовали на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira 3 и металлографическом микроскопе OLYMPUS GX 51. Рентгенофазовый анализ проводили в медном  $K_{\alpha}$ -излучении.

Таблица 2

Режимы термической обработки сплава 22X15K4MC

Температура закали, °С	Температура старения, °С	Время выдержки, мин
1250	670	15
	670,640	15,40
	670,640,600	15,40,40
	670,640,600,575	15,40,40,40
	670,640,600,575, 555	15,40,40,40,30
	670,640,600,575, 555,535	15,40,40,40,30, 30
	670,640,600,575, 555,535,525	15,40,40,40,30, 30,30
	670,640,600,575, 555,535,525,500	15,40,40,40,30, 30,30,30
	670,640,600,575, 555,535,525,500,480	15,40,40,40,30, 30,30,30,30

### Результаты и их обсуждение

Плотность заготовок после спекания понижается с повышением количества самария (табл. 3).

Установлена прямая зависимость количества и размера пор от содержания самария (рис. 1). До содержания 0,4 % Sm пористость не превышает 1 %.

<sup>1</sup> ГОСТ 19693–74. Материалы магнитные. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 2005. 33 с.

Таблица 3

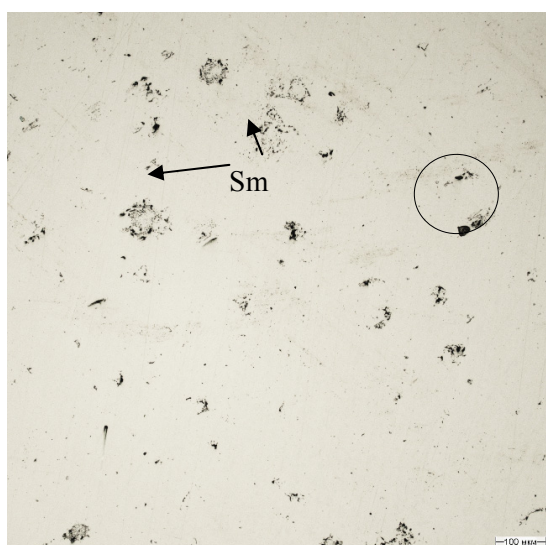
Плотность и пористость заготовок после спекания

22X15K4MC + Sm				
Плотность г/см <sup>3</sup>	0,3 % Sm	0,4 % Sm	0,5 % Sm	0,6 % Sm
	7,9	7,9	7,6	7,57
Требуемая плотность, г/см <sup>3</sup>	≤7,5			
Пористость, %	1	1	3,8	4,3

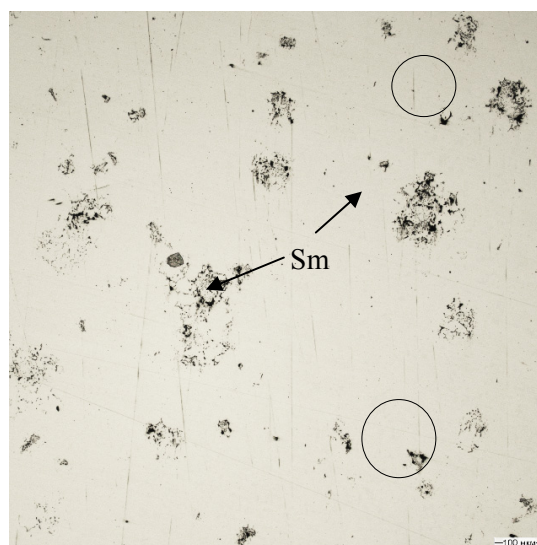
Микроструктура сплава 22X15K4MC, легированного Sm в количестве 0,5 %, после закалки представляет собой α-твердый раствор с частицами Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>, расположенными как по границам, так

и внутри зерен α-фазы (рис. 2, а). Многоступенчатое старение после закалки не приводило к существенному изменению микроструктуры, кроме более контрастного травления, которому способствовал распад закаленной α-фазы на сильномагнитную альфа-1 и слабомагнитную альфа-2 (рис. 2, б).

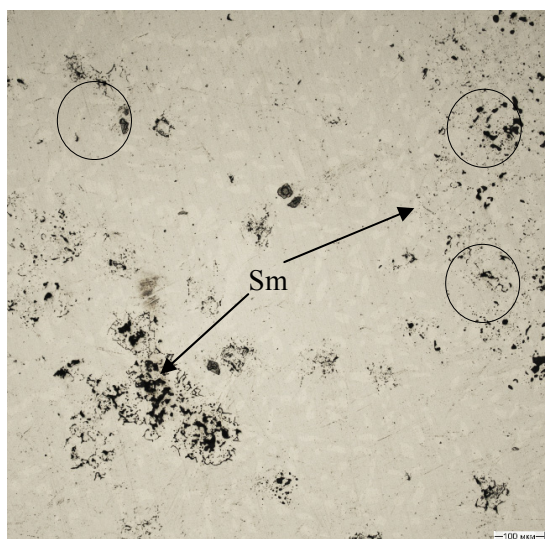
По результатам картирования основных компонентов после старения выявлено, что в структуре, наряду с локальными скоплениями крупных частиц Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> от 5 до 20 мкм, не растворившихся в твердом растворе, присутствовали микрочастицы размером порядка 1–2 мкм, содержащие самарий и выделившиеся после старения (рис. 3, б). Сохранение самария в виде его соединений с кобальтом обусловлено отсутствием их растворимости в железе [25].



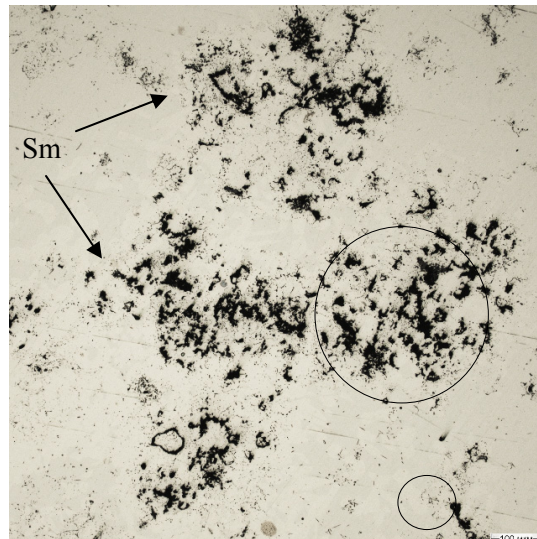
а



б



в



г

Рис. 1. Микроструктура образцов после закалки: а – 0,3 % Sm; б – 0,4 % Sm; в – 0,5 % Sm; г – 0,6 % Sm, кругами обозначены поры

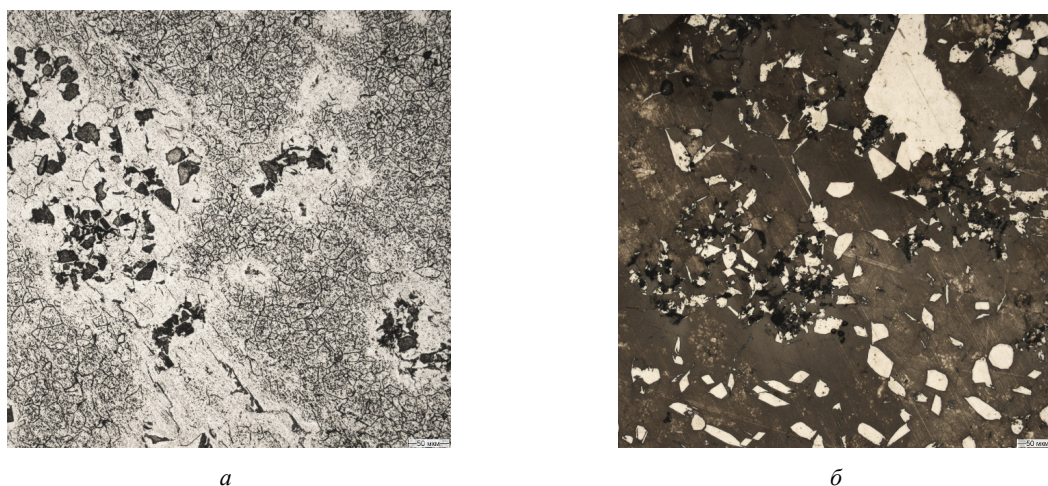


Рис. 2. Микроструктура сплава 22X15K4MC с 0,5 % Sm: а – после закалки; б – после старения

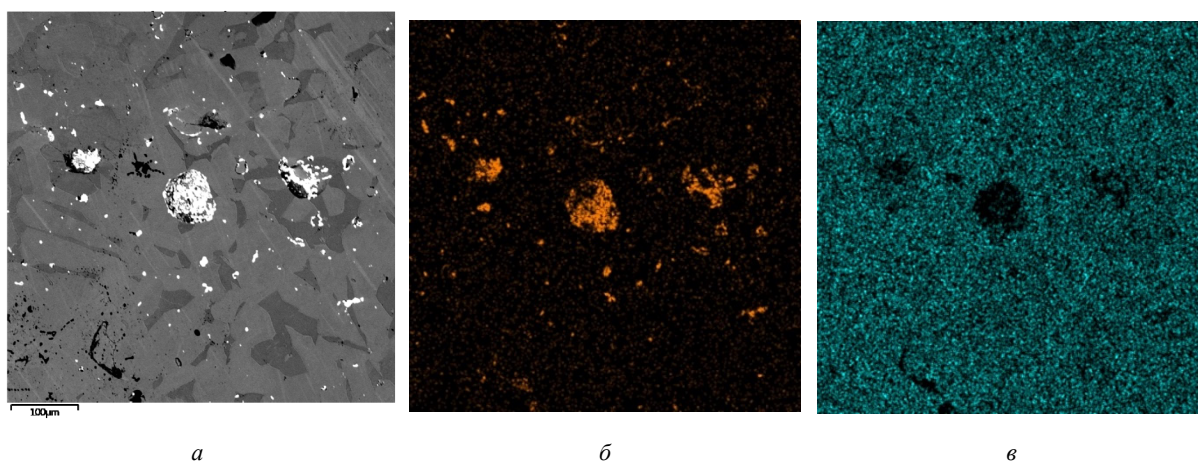


Рис. 3. Микроструктура сплава 22X15K4MC с 0,5 % Sm после старения (а) и карты распределения Sm (б) и Co (в) в структуре

Таблица 4

Магнитные свойства сплава 22X15K4MC с микродобавками самария после старения

$T_{\text{старения}}, ^\circ\text{C}$	22X15K4MC $H_c, \text{кА/м}/B_r, \text{Тл}$	$T_{\text{старения}}, ^\circ\text{C}$	22X15K4MC + Sm			
			0,3 % Sm $H_c, \text{кА/м}/B_r, \text{Тл}$	0,4 % Sm $H_c, \text{кА/м}/B_r, \text{Тл}$	0,5 % Sm $H_c, \text{кА/м}/B_r, \text{Тл}$	0,6 % Sm $H_c, \text{кА/м}/B_r, \text{Тл}$
670	2,7/0,40	670	4,5/0,55	6,2/0,78	3,9/0,44	5,9/0,60
640	5,1/0,77	640	6,1 /0,69	7,8/0,85	6,5/0,82	8,1/0,74
600	8,5/0,97	600	9,6 /0,83	10,0/0,88	10,7/0,93	12,1/0,80
575	16,8/0,99	575	19,4/ 0,9	18,7/0,92	19,5/0,95	22,6/0,82
555	24,70,99	555	29,1/0,86	23,0/0,85	26,4/0,92	30,7/0,79
535	28,4/0,98	525	32,8/0,84	28,2/0,88	29,7/0,90	33,1/0,78
525	28,4/0,93	500	32,4/0,83	26,5/0,85	29,4/0,86	32,1/0,74
500	31,3/0,92	480	33,6/0,83	28,8/0,87	32,9/0,86	33,5/0,77
480	32,1/0,92	480	34,4/0,85	29,3/0,87	33,0/0,85	33,8/0,77
$(BH)_{\text{max}}, \text{кДж/м}^3$	12	–	11	7	11	6,0
$K_H$ при 600 °C	0,66		0,66	0,72	0,73	0,66

Определены температурно-временные параметры старения образцов, обеспечивающие получение максимальных магнитных свойств (табл. 4). При легировании сплава 22X15K4MC самарием

в количестве от 0,3 до 0,6 % на первых трех ступенях старения происходил наиболее быстрый рост  $B_r$  и  $H_c$ . На последующих ступенях продолжался рост только  $H_c$ ,  $B_r$  при этом на 4-й ступени старе-

ния достигала пика и на последующих ступенях только снижалась. Так, наибольшее снижение  $V_r$  наблюдали при содержании самария 0,6 %. После полного цикла старения наблюдали повышение  $H_c$  в сплавах с 0,3; 0,5 и 0,6 % самария на 3–7 %, по сравнению со сплавом без добавок  $Sm_2Co_{17}$  (см. табл. 4).

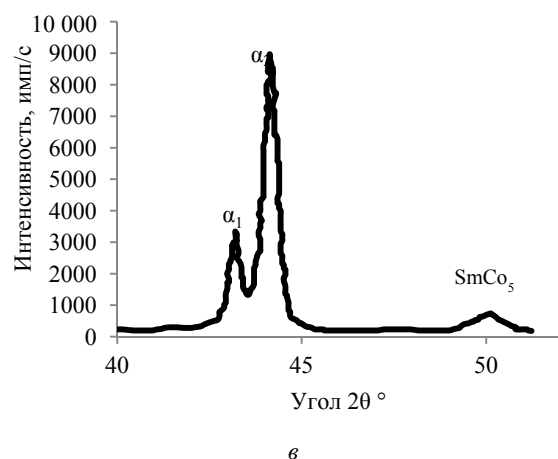
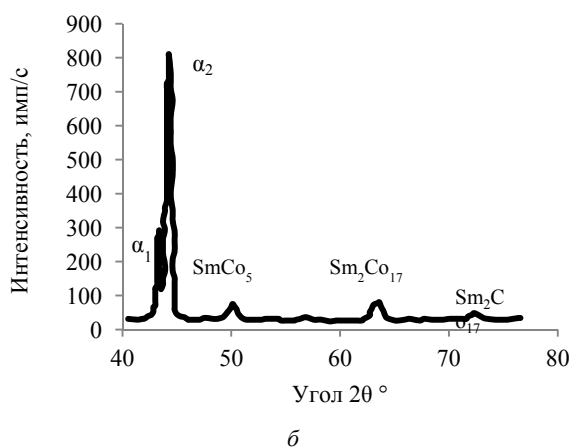
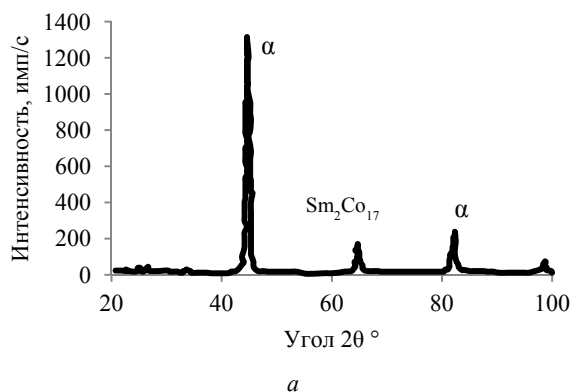


Рис. 4. Дифрактограммы сплава 22X15K4MC с 0,5 % Sm при замедленной съемке со скоростью 0,2 град/мин после закалки (а) и после старения в интервале 2θ от 40° до 80° (б) и от 40° до 55° (в)

Вместе с  $V_r$  и  $H_c$  определяли коэффициент прямоугловости петли магнитного гистерезиса ( $K_p$ ). Установлено, что  $K_p$  имеет наибольшие зна-

чения после 3-й ступени старения (см. табл. 4). Обнаружено, при легировании сплава 22X15K4MC самарием в количестве 0,4–0,5 %  $K_p$  выше на 9–11 % в сравнении с исходным сплавом при данном режиме термообработки.

Для подтверждения результатов исследования микроструктуры был выполнен рентгеноструктурный анализ после закалки и старения сплава с 0,5 % Sm (рис. 4). После закалки дифрактограмма (см. рис. 4, а) иллюстрирует пик  $\alpha$ -фазы (110), межплоскостное расстояние которого составляет 2,034 Å и соответствует твердому раствору состава Fe–Cr–Co. Пик фазы  $Sm_2Co_{17}$  присутствует на дифрактограмме после закалки и старения и соответствует межплоскостному расстоянию 1,44 Å.

После старения в сплаве 22X15K4MC с 0,5 % Sm происходит распад твердого раствора, о чем свидетельствует раздвоение пика  $\alpha$ -фазы на два локальных максимума (см. рис. 4, б, в). Раздвоение дифракционных пиков на рентгеновских дифрактограммах связано с различием межплоскостных расстояний сильномагнитной фазы, богатой Fe–Co ( $\alpha_1 = 2,0765$  нм), и слабомагнитной фазы, богатой Cr ( $\alpha_2 = 2,0311$  нм). Периодическое расположение частиц слабомагнитной и сильномагнитной фаз в матрице обеспечивает высокие магнитные свойства [26]. Кроме  $\alpha$ -фазы, также были обнаружены дифракционные пики, соответствующие фазам  $Sm_2Co_{17}$  (64,9 °C, 74,68 °C) и  $SmCo_5$  (50,798 °C), что подтверждается результатами предшествующих исследований [24] и указывает на перераспределение самария и получение стехиометрического состава, отличного от исходного компонента (см. рис. 4, б, в).

## Выводы

1. Легирование сплава 22X15K4MC самарием в количестве 0,5 % позволяет получать гистерезисные магниты с коэрцитивной силой в диапазоне от 3,9 до 33 кА/м и остаточной магнитной индукцией от 0,44 до 0,95 Тл при  $K_p$  до 0,73, что является актуальным показателем для прецизионного приборостроения.

2. Оптимальное содержание самария в гребневом сплаве 22X15K4MC, обеспечивающее сочетание высокой коэрцитивной силы, остаточной индукции и  $K_p$  при удовлетворительной плотности, составляет 0,4–0,5 %.

3. Термическая обработка сплава 22X15K4MC с добавками самария способствует образованию фазы  $Sm_2Co_5$ , имеющей, в соответствии с литературными данными, более высокие магнитные свойства, чем  $Sm_2Co_{17}$ . Неполное растворение частиц  $Sm_2Co_{17}$  требует дальнейших исследований в части подготовки шихтовых материалов и спекания.

### Список литературы

1. Скороход В.А., Солонин С.М. Физико-металлургические основы спекания порошков. – М.: Металлургия, 1984. – 159 с.
2. Самойлина В.Е. Порошковая металлургия // Научный альманах. – 2016. – № 5-3. – С. 149–150.
3. Витязь П.А., Капцевич В.М., Шелег В.К. Пористые порошковые материалы и изделия из них. – Минск: Высш. шк., 1987. – 164 с.
4. Tanaka I., Yashiki H. Magnetic and mechanical properties of newly developed high-strength nonoriented electrical steel // IEEE Trans. Magn. – 2010. – Vol. 46. – P. 290–293.
5. Менушенков В.П. Структурные превращения и коэрцитивная сила в сплавах для постоянных магнитов. Ч. 2. Спеченные сплавы на основе Sm–Co и Nd–Fe–B // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – С. 163–178.
6. Prospects for non-rare earth permanent magnets for traction motors and generators / M.J. Kramer, R.W. McCallum, I.A. Anderson, S. Constantinides // JOM. – 2012. – Vol. 64. – P. 752–763.
7. Nakamura E., Sato K. Managing the scarcity of chemical elements // Nat. Mater. – 2011. – Vol. 10. – P. 158–161.
8. Генералова К.Н., Ряпосов И.В., Шацов А.А. Порошковые сплавы системы Fe–Cr–Co, термообработанные в области «гребня» // Письма о материалах. – 2017. – № 2(26). – С. 133–136.
9. Kaneko H., Homma M., Nakamura K. New ductile permanent magnet of Fe–Cr–Co system // AIP Conf. Proc. – 1972. – Vol. 5. – P. 1088–1092.
10. Taosa S., Ahmad Z. Enhancement of magnetic and microstructural properties in Fe–Cr–Co–Mo–V–Zr–Y permanent magnetic alloy // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 15 August 2019. – Vol. 484. – P. 88–94.
11. Устюхин А.С., Алымов М.И., Миляев И.М. Магнитные гистерезисные свойства Fe–26Cr–16Co порошковых магнитотвердых сплавов // Письма о материалах. – 2014. – № 1. – С. 59–61.
12. 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 / T.A. Vompe, A.S. Ustyukhin, I.M. Milyaev, V.A. Zelensky // Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. – 2016. – Vol. 11, no. 4. – P. 77–84. DOI: 10.21209/2308-8761-2016-11-4-77-84
13. Artamonov E.V., Libman M.A., 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.
14. Белозеров Е.В. Высокопрочные магнитотвердые сплавы на основе Fe–Cr–Co с пониженным содержанием хрома и кобальта // Физика металлов и металлургия. – 2012. – Т. 113, № 4. – С. 339–346.
15. Гидродинамический гироскоп: пат. 2310163, Российская Федерация: МПК G01C 19/00 / Осин В.К. [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Бердский электромеханический завод». – № 2006132884/28; заявл. 14.09.06; опубл. 10.11.07, Бюл. № 31. – 11 с.

16. Либман М.А. Магнитотвердые сплавы на основе системы Железо–Хром–Кобальт // Материаловедение. – 2010. – № 9. – С. 58–64.
17. Распопов В.Я. Теория гироскопических систем // Гиросприборы / ТулГУ. – Тула, 2018. – 193 с.
18. Юльметова О.С., Щербак А.Г., Челпанов И.Б. Специальные технологии изготовления прецизионных узлов и элементов гироскопических приборов: учеб. пособие / под ред. В.А. Валетова; Ун-т ИТМО. – СПб., 2017. – 131 с.
19. Ахматов М.Г. Синхронные машины. Специальный курс. – М.: Высш. шк., 1984. – 91 с.
20. Мирзаянов Р.Р., Габдрахманова А.А. Постоянные магниты в системах возбуждения синхронных двигателей. Электротехнические комплексы и системы // Межвузовский научный сборник. – 2014. – С. 172–174.
21. Брянцев А.А. Применение Fe–Cr–Co в качестве активного слоя ротора синхронно-гистерезисного гидродвигателя // Материалы IV Рос. молод. науч. шк.-конф., г. Томск, 1–3 ноября 2016 г. / ЦРУ. – Томск, 2016. – С. 77–80.
22. Конструкционные и электротехнические материалы / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов [и др.]; под ред. В.А. Феликова. – М.: Высш. шк., 1990. – 296 с.
23. Магнитные материалы специализированного назначения [Электронный ресурс] // academout.ru. – URL: <http://academout.ru/lectures/3/5.php> (дата обращения: 20.07.2021).
24. Effects of Sm on structural, textural and magnetic properties of Fe–28Cr–20Co–3Mo–2V–2Ti hard magnetic alloy / Shan Tao, Zubair Ahmad, Pengyue Zhang, Xiaomei Zheng, Suyin Zhang // Journal of Alloys and Compounds. – October 2019.
25. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных сплавов на основе железа: справ. изд. / О.А. Банных, П.Б. Будберрг, С.П. Алисова [и др.]. – М.: Металлургия, 1986. – 449 с.
26. Шацов А.А. Порошковые материалы системы железо–хром–кобальт // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – № 7. – С. 38–43.

### References

1. Skorokhod V.A., Solonin S.M. Fiziko-metallurgicheskie osnovy spekaniia poroshkov [Physical and metallurgical basics of sintering powders]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 159 p.
2. Samoilina V.E. Poroshkovaia metallurgii [Powder metallurgy]. *Nauchnyi al'manakh*, 2016, no. 5-3, pp. 149–150.
3. Vitiaz' P.A., Kaptsevich V.M., Sheleg V.K. Poristye poroshkovye materialy i izdeliia iz nikh [Porous powder materials and products made of them]. Minsk: Vycshaia shkola, 1987, 164 p.
4. Tanaka I., Yashiki H. Magnetic and mechanical properties of newly developed high-strength nonoriented electrical steel. *IEEE Trans. Magn.*, 2010, vol. 46, pp. 290–293.
5. Menushenkov V.P. Strukturnye prevrashcheniia i koertsitivnaia sila v splavakh dlia postoiannykh magnetov. Ch. 2. Spechennye splavy na osnove Sm–Co i Nd–Fe–B [Structural transformations and coercive force in alloys for permanent magnets. Part 2: Sintered alloys based on Sm–Co and Nd–Fe–B]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2007, pp. 163–178.

6. Kramer M.J., McCallum R.W., Anderson I.A., Constantinides S. Prospects for non-rare earth permanent magnets for traction motors and generators. *JOM*, 2012, vol. 64, pp. 752–763.
7. Nakamura E., Sato K. Managing the scarcity of chemical elements. *Nature Materials*, 2011, vol. 10, pp. 158–161.
8. Generalova K.N., Riapsov I.V., Shatsov A.A. Poroshkovye splavy sistemy Fe–Cr–Co, termoobrabotannye v oblasti «grebniya» [Powder alloys of the Fe–Cr–Co system, heat-treated in the "comb" area]. *Pis'ma o materialakh*, 2017, no. 2(26), pp. 133–136.
9. Kaneko H., Homma M., Nakamura K. New ductile permanent magnet of Fe–Cr–Co system. *AIP Conference Proceedings*, 1972, vol. 5, pp. 1088–1092.
10. Taao S., Ahmadi Z. Enhancement of magnetic and microstructural properties in Fe–Cr–Co–Mo–V–Zr–Y permanent magnetic alloy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 484, pp. 88–94.
11. Ustiukhin A.S., Alymov M.I., Miliayev I.M. Magnitnye gisterезисnye svoystva Fe–26Cr–16Co poroshkovykh magnitotverdykh splavov [Magnetic hysteresis properties of Fe–26Cr–16Co powder magnetically hard alloys]. *Pis'ma o materialakh*, 2014, no. 1, pp. 59–61.
12. Vompe T.A., Ustyukhin A.S., Milyaev I.M., Zelensky 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, pp. 77–84. DOI: 10.21209/2308-8761-2016-11-4-77-84
13. Artamonov E.V., Libman M.A., Rudanovskii N.N. Magnetically hard materials for the motors of synchronous hysteresis electric motors. *Steel in Translation*, 2007, vol. 37, no. 6, pp. 547–551.
14. Belozherov E.V. Vysokoprochnye magnitotverdye splavy na osnove Fe–Cr–Co s ponizhennym soderzhaniiem khroma i koba'ta [High-strength Fe–Cr–Co-based hard magnetic alloys with reduced chromium and cobalt content]. *Fizika metalliv i metallovedenie*, 2012, vol. 113, no. 4, pp. 339–346.
15. Osin V.K. et al. Gidrodinamicheskii giroskop [Hydrodynamic gyroscope]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2310163 (2007).
16. Libman M.A. Magnitotverdye splavy na osnove sistemy Zhelezo–Khrom–Koba't [Magnetically hard alloys based on the Iron–Chromium–Cobalt system]. *Materialovedenie*, 2010, no. 9, pp. 58–64.
17. Raspopov V.Ia. Teoriia giroskopicheskikh sistem [Theory of gyroscopic systems]. *Giropribory*. TulGU. Tula, 2018, 193 p.
18. Iul'metova O.S., Shcherbak A.G., Chelpanov I.B. Spetsial'nye tekhnologii izgotovleniia pretsizionnykh uzlov i elementov giroskopicheskikh priborov [Special technologies for the production of precision units and elements of gyroscopic devices]. Ed. V.A. Valetova; Universitet ITMO. Saint-Petersburg, 2017, 131 p.
19. Akhmatov M.G. Sinkhronnye mashiny. Spetsial'nyi kurs [Synchronous Machines. Special Course]. Moscow: Vysshaya shkola, 1984, 91 p.
20. Mirzaianov R.R., Gabdrakhmanova A.A. Postoiannye magnity v sistemakh vzbuzhdeniia sinkhronnykh dvigatelei. Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy [Permanent magnets in synchronous motor excitation systems. Electrical complexes and systems]. *Mezhvuzovskii nauchnyi sbornik*, 2014, pp. 172–174.
21. Briantsev A.A. Primenenie Fe–Cr–Co v kachestve aktivnogo sloia rotora sinkhronno-gisterезисnogo girodvigatel'ia [Application of Fe–Cr–Co as an active layer of synchronous hysteresis gyro motor rotor]. *Materialy IV Rossiyskoi molodoi nauchnoi shkoly-konferentsii*. TsRU. Tomsk, 2016, pp. 77–80.
22. Borodulin V.N., Vorob'ev A.S., Popov S.Ia. et al. Konstruktsionnye i elektrotekhnicheskie materialy [Structural and electrotechnical materials]. Ed. V.A. Felikova. Moscow: Vysshaya shkola, 1990, 296 p.
23. Magnitnye materialy spetsializirovannogo naznacheniia [Magnetic materials for specialized purposes]. URL: <http://academout.ru/lectures/3/5.php> (accessed 20 July 2021).
24. Shan Tao, Zubair Ahmad, Pengyue Zhang, Xiaomei Zheng, Suyin Zhang Effects of Sm on structural, textural and magnetic properties of Fe–28Cr–20Co–3Mo–2V–2Ti hard magnetic alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019.
25. Bannykh O.A., Budberg P.B., Alisova S.P. et al. Diagrammy sostoianiia dvoynykh i mnogokomponentnykh splavov na osnove zheleza [State diagrams of double and multi-component iron-based alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 449 p.
26. Shatsov A.A. Poroshkovye materialy sistemy zhelezo–khrom–koba't [Powder materials of the iron–chrome–cobalt system]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2008, no. 7, pp. 38–43.

Получено 29.07.2021

Опубликовано 30.09.2021

### Сведения об авторах

**Мариева Мария Александровна** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры металловедения, термической и лазерной обработки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: marievamar@rambler.ru.

**Козвонин Владислав Анатольевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, начальник лаборатории ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», e-mail: kozzzvonin@gmail.com.

**Шацов Александр Аронович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металловедения, термической и лазерной обработки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: shatsov@pstu.ru.

### About the authors

**Maria A. Marieva** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Metallurgy, Thermal and Laser Treatment of Metals, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: marievamar@rambler.ru.

**Vladislav A. Kozvonin** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Head of the Laboratory, PJSC "Perm Scientific and Production Instrument-Making Company", e-mail: kozzzvonin@gmail.com.

**Alexander A. Shatsov** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Metal Science, Thermal and Laser Treatment of Metals, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: shatsov@pstu.ru.