

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Бельтюкова, М.А. Влияние добавки КС25ДЦ на стабильность магнитных свойств и механические характеристики сплава на основе системы Fe-Cr-Co-Mo / М.А. Бельтюкова, С.А. Оглезнева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 57–65. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.07

Please cite this article in English as (Perm Polytech Style):

Beltyukova M.A., Oglezneva S.A. Influence of the additive KS25DC on the stability of magnetic properties and mechanical characteristics of the alloy based on the Fe-Cr-Co-Mo system. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2024, vol. 26, no. 2, pp. 57-65. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.07

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 26, № 2, 2024**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.07

УДК 669.018.58

**М.А. Бельтюкова, С.А. Оглезнева**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Российская Федерация

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ КС25ДЦ НА СТАБИЛЬНОСТЬ  
МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА  
НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ FE-CR-CO-MO**

К магнитным материалам, используемым в составе навигационных систем, предъявляются высокие требования по точности и надежности. Надежность магнитных сплавов, работающих в условиях перепадов температур, напрямую зависит от стабильности магнитных свойств. Стабильным считается материал, который сохраняет свои свойства с течением времени, при повышении рабочей температуры или при воздействии на него внешнего магнитного поля и возвращается в исходное магнитное состояние после устранения дестабилизировавшей его силы. Существуют способы повышения стабильности магнитных сплавов, основанные на комбинировании материалов с разными температурными коэффициентами (ТК). Известно, что сплавы системы SmCo обладают низким температурным коэффициентом индукции ( $-0,035\% / ^\circ\text{C}$  при  $T=300\text{ }^\circ\text{C}$  для сплава КС25ДЦ). Исходя из этого, возникает вопрос: возможно ли повысить температурную стабильность магнитных свойств сплава на основе системы Fe-Cr-Co-Mo, легируя его добавкой редкоземельного магнита КС25ДЦ?

Еще одной важной характеристикой, влияющей на надежность приборов, является механическая прочность. Прочность порошковых сплавов сильно зависит от пористости, которая может возрастать при введении различных добавок. Таким образом, в работе показано влияние добавки редкоземельного магнита марки КС25ДЦ в количестве от 1,47 до 8,8 % на прочностные характеристики и стабильность магнитных свойств порошкового магнитотвердого сплава на основе системы Fe-Cr-Co-Mo. Получены температурные коэффициенты (ТК) магнитной индукции ( $\text{TK}(B_r), \%/ ^\circ\text{C}$ ), коэрцитивной силы ( $\text{TK}(H_c), \%/ ^\circ\text{C}$ ) и магнитной энергии ( $\text{TK}(W_H)_{\text{max}}, \%/ ^\circ\text{C}$ ) при повышенных температурах. Определена концентрация добавки, оказывающая положительное влияние, на механическую прочность и стабильность магнитных свойств сплава.

**Ключевые слова:** постоянные магниты, порошковый магнитотвердый сплав, легирование РЗМ, прочность порошковых магнитов, температурная стабильность магнитных свойств, надежность навигационных систем.

M.A. Belyukova, S.A. Oglezneva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## INFLUENCE OF THE ADDITIVE KS25DC ON THE STABILITY OF MAGNETIC PROPERTIES AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE ALLOY BASED ON THE FE-CR-CO-MO SYSTEM

The magnetic materials used in navigation systems have high requirements for accuracy and reliability. The reliability of magnetic alloys operating under conditions of temperature differences directly depends on the stability of magnetic properties. A material that retains its properties over time, with an increase in operating temperature or when exposed to an external magnetic field, or returns to its original magnetic state after the destabilizing force is eliminated, is considered stable. There are ways to increase the stability of magnetic alloys based on the combination of materials with different temperature coefficients (TC). It is known that SmSo alloys have a low temperature induction coefficient ( $-0.035\%/^{\circ}\text{C}$  at  $T=300^{\circ}\text{C}$  for the KS25DC alloy). Based on this, the question arises: is it possible to increase the temperature stability of the magnetic properties of an alloy based on the Fe-Cr-Co-Mo system by alloying it with the addition of a rare earth magnet KS25DC?

Another important characteristic that affects the reliability of devices is mechanical strength. The strength of powder alloys strongly depends on porosity, which can increase with the introduction of various additives. Thus, the work shows the effect of the addition of a rare earth magnet of the KS25DC brand in an amount from 1.47 to 8.8% on the strength characteristics and stability of the magnetic properties of a powdered magnetic hard alloy based on the Fe-Cr-Co-Mo system. The temperature coefficients (TC) of magnetic induction (TC(Br),  $\%/^{\circ}\text{C}$ ), coercive force (TC(Hc),  $\%/^{\circ}\text{C}$ ) and magnetic energy (TC(BH)max,  $\%/^{\circ}\text{C}$ ) at elevated temperatures were obtained. The concentration of the additive has been determined, which has a positive effect on the mechanical strength and stability of the magnetic properties of the alloy.

**Keywords:** permanent magnets, magnetic hard powder alloy, REM alloying, strength of powder magnets, temperature stability of magnetic properties, reliability of navigation systems.

Температурная стабильность магнитов, в том числе редкоземельных (РЗМ), является актуальной технической проблемой [1; 2]. Ее решение заключается в оптимизации химического состава магнитов [3], разработке новых типов сплавов и применении термической обработки [4; 5].

В данном исследовании рассматривается температурная стабильность основных магнитных характеристик коэрцитивной силы  $H_c$ , магнитной индукции  $B_r$  и магнитной энергии  $(BH)_{\text{max}}$ . Проблема стабильности магнитных свойств магнитов связана с механизмами перемагничивания и самопроизвольного намагничивания, о них известно достаточно мало, кроме того, что в различных магнитных системах наблюдается движение доменных стенок и может происходить образование доменов обратной намагниченности, что, в свою очередь, приводит к изменению свойств [6]. Нестабильность магнитных свойств также связывают с изменением магнитной структуры, стремящейся к термодинамическому равновесию [7]. В работе [8] показано влияние термического воздействия при  $650^{\circ}\text{C}$  на процессы упорядочения строения доменной структуры и изменение структуры стенок Блоха. Размагничивающее поле, наоборот, разупорядочивает структуру и разрушает домены, что приводит к снижению магнитных свойств.

Наиболее высокую стабильность свойств при высоких рабочих температурах (до  $550^{\circ}\text{C}$ ), равно как и при длительном хранении имеют редкоземельные магниты системы SmCo, отличающиеся высокой температурой Кюри ( $727^{\circ}\text{C}$  для соединения  $\text{SmCo}_5$  и  $920^{\circ}\text{C}$  для соединения  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ) [9; 10]. Существует высокоэффективный метод получения низких значений температурного коэффициента

индукции (ТКИ) магнита за счет соединения стандартных блоков NdFeB и SmCo. Расположение блоков в определенном порядке в дипольном магните Хальбаха приводит к компенсации ТКИ каждого из материалов [6]. Однако при соединении двух магнитов с противоположным направлением магнитного поля происходит его ослабление, но уже существуют методы борьбы с этим недостатком [11]. Также имеют место альтернативные способы стабилизации рабочей температуры магнитов, основанные на методах магнитной калориметрии. Взамен использования материала с низким ТКИ можно применять охлаждающую платформу для магнита, тем самым не допуская его перегрева [1].

Порошковые сплавы, используемые в качестве роторов гистерезисных двигателей, должны обладать высокой механической прочностью [12], на которую влияют пористость и плотность [13]. В зависимости от типа добавки и ее концентрации пористость может как снижаться [14; 15], так и возрастать. Поэтому изменение характеристик прочности также имеет немонотонный характер, и для каждой добавки имеется ее оптимальное содержание, дающее максимум свойств [16].

Ранее в работах [17; 18] было установлено положительное влияние легирования редкоземельным элементом Sm. В исследованиях [19; 20] показано, что добавка KS25DC в количестве 2,9 % в сплав 22X15K4MC позволяет повысить  $H_c$  на 40 %,  $B_r$  на 15 %,  $(BH)_{\text{max}}$  в 2 раза по сравнению с исходным сплавом. Таким образом, неизученным остается вопрос о стабильности магнитных характеристик сплава и механических свойств при соединении двух магнитных систем с различными ТК и уровнем механических свойств.

Цель исследования – установить влияние, оказываемое добавкой КС25ДЦ на стабильность магнитных свойств и механические характеристики сплава 22Х15К4МС.

**Методика исследований**

В работе исследованы сплавы 22Х15К4МС с добавками редкоземельного магнита марки КС25ДЦ в концентрациях, указанных в табл. 1. Состав сплава КС25ДЦ приведен в табл. 2. Для изготовления опытных образцов использовали порошки следующих металлов и сплавов: хром ПХ–1С, ТУ 14–5–298–99, со средним размером частиц  $r=10$  мкм и стандартным отклонением  $\sigma=5$  мкм; кобальт ГП–ОК ТУ 1793–008–92  $r=24$  мкм,  $\sigma=13$  мкм; железо ОСЧ 6–2, ТУ 6–09–05808008–262–92  $r=2$  мкм,  $\sigma=2$  мкм; феррокремний ФС50, ГОСТ 1415–93 92,  $r=8$  мкм,  $\sigma=4$  мкм; молибден МПЧ, ТУ 48–19–69–80,  $r=2$  мкм,  $\sigma=1$  мкм.

Таблица 1

Химический состав опытных сплавов

Номер плавки	Содержание элемента, мас. %					
	Fe	Cr	Co	Mo	Si	КС25ДЦ
1	57,5	22,5	15	4	1	–
2	56,03					1,47
3	54,6					2,9
4	53,1					4,4
5	51,6					5,9
6	48,7					8,8

Порошок сплава КС25ДЦ [21] получали дроблением бракованных магнитов с размерами частиц до 63 мкм.

Таблица 2

Химический состав сплава КС25ДЦ

КС25ДЦ	Содержание элемента, мас. %				
	Sm	Co	Fe	Cu	Zr
24–27	57,5–43,5	13–20	4–6	1,5–3,5	

Смесь порошков прессовали на гидравлическом прессе при давлении 30–32 т в металлической пресс-форме и спекали в вакуумной печи при 1350 °С в течение 2 ч с остаточным давлением 10<sup>-2</sup> мбар. Плотность образцов после спекания определяли методом гидростатического взвешивания [22–24].

После спекания образцы закаливали при температуре 1250 °С в 15%-ном водном растворе NaCl и проводили старение, последовательно снижая температуру 670, 640, 600, 575, 555, 535, 525 °С и выдерживая на каждой ступени по 15–40 мин с приложением внешнего магнитного поля 150 кА/м. Изменение основных параметров магнитных свойств

определяли при температурах 20, 60, 80, 110 и 150 °С. Температурные коэффициенты коэрцитивной силы, магнитной индукции и магнитной энергии рассчитывали по формуле [23]:

$$TK(x) = \frac{x_i - x_1}{x_i(T_2 - T_1)},$$

где  $x_i$  – изменяемая характеристика ( $H_c$ ,  $B_r$ ,  $(BH)_{max}$ ) при 20 °С;  $x_1$  – изменяемая характеристика ( $H_c$ ,  $B_r$ ,  $(BH)_{max}$ ) при повышенной температуре нагрева  $T_1$ ;  $T_1$  – температура в °С;  $T_2$  – температура нагрева в °С.

Изменение магнитных свойств при температурах 20, 60, 80, 110, 150 °С исследовали с помощью гистерезисграфа Permagraph L с программным обеспечением PERMA. Механические свойства исследуемых образцов определяли методом одноосного растяжения в соответствии ГОСТ 1497-84 на универсальной электромеханической испытательной машине Instron 5969. Структуру магнитных образцов исследовали на металлографическом микроскопе OLYMPUS GX 51.

**Результаты и их обсуждение**

Согласно результатам работы [24], предел прочности, твердость, а также ударная вязкость и усталостная прочность являются характеристиками, чувствительными к наличию и степени пористости. С целью изучения влияния добавки на механические свойства образцов определяли их пористость и плотность, а также размер зерна после закалки и старения. При повышении содержания добавки КС25ДЦ плотность снижалась с повышением пористости (табл. 3).

Таблица 3

Свойства опытных сплавов

Содержание добавки КС25ДЦ, %	Плотность / пористость, %	Средний размер зерна, закалка мкм	Средний размер зерна, старение мкм	HRC	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
0	7,9/0,3	150	70	34	474	382	0,2
1,47	7,9/0,5	104	93	38	631	486	0,3
2,9	7,8/1,4	76	49	40	700	550	0,3
4,4	7,7/2,7	66	55	36	625	524	0,5
5,9	7,7/2,7	65	57	20	381	340	0,2
8,8	7,6/4,2	65	76	30	326	–	–

Механические характеристики: твердость, предел прочности  $\sigma_B$  и предел текучести  $\sigma_{0,2}$  растут с повышением концентрации добавки КС25ДЦ и достигают максимума при 2,9 % КС25ДЦ, после чего снижаются.

Согласно результатам фрактографического анализа, выявлено, что характер разрушения всех образцов хрупкий с кристаллическим видом излома и наличием фасеток скола. Образец исходного сплава 22Х15К4МС имеет крупное зерно порядка 150–200 мкм (рис. 1, а). Образцы, содержащие добавку КС25ДЦ, имели более мелкое зерно, порядка 50–100 мкм, что связано с расположением включений КС25ДЦ по границам зерна или в порах, препятствующих его росту. Поверхность

излома образцов с 4,4 и 5,6 % добавки окислена, имеет темно-серый матовый оттенок, большое количество пор, в структуре располагается как в виде отдельных включений, так и в виде сплавленных участков (рис. 1, б). Образец с максимальной концентрацией добавки 8,8 % имел самые низкие характеристики прочности, что связано с преимущественным расположением и замыканием добавки по границе зерен, а также сегрегацией включений в порах (рис. 1, з).

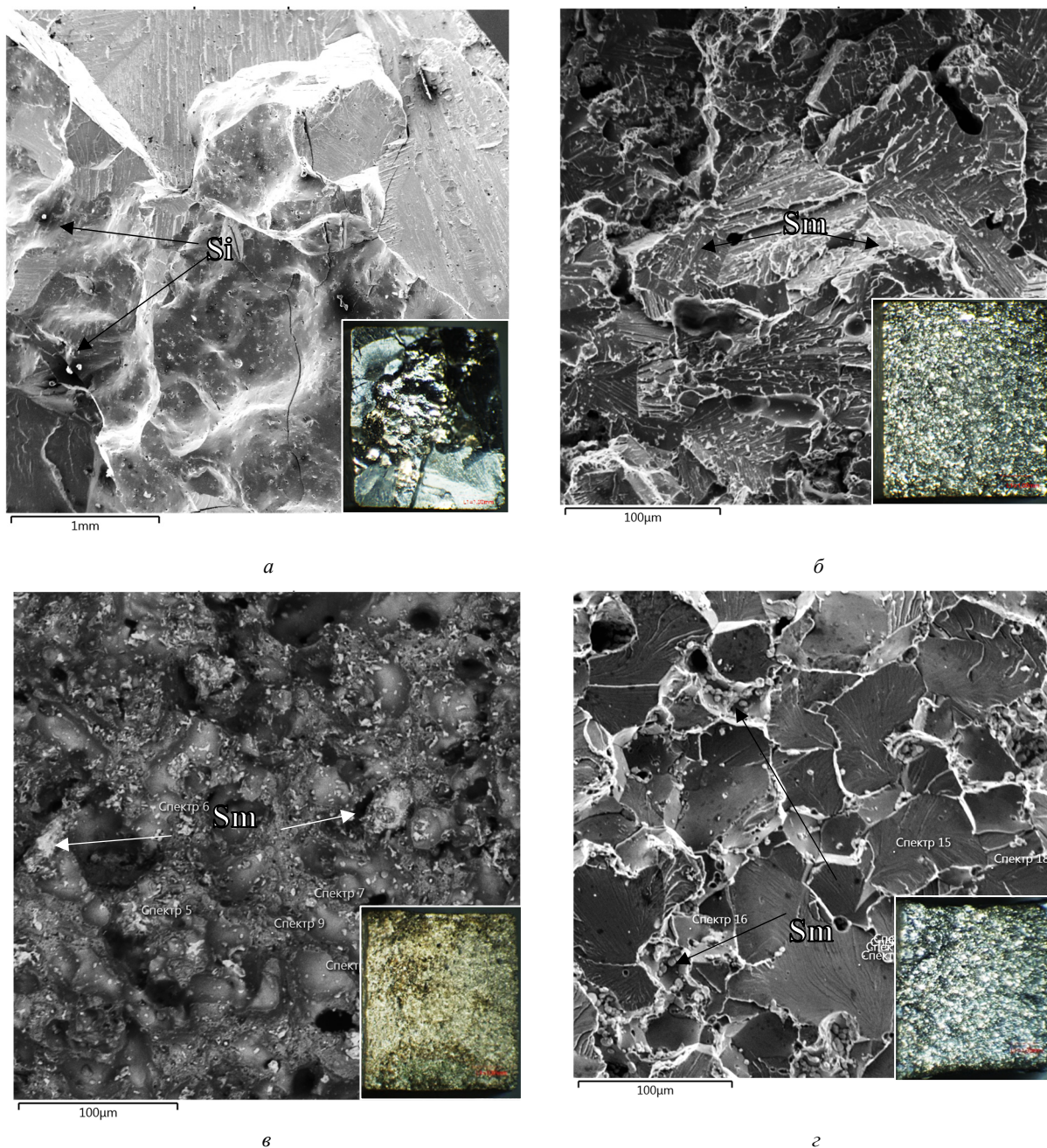


Рис. 1. Поверхность изломов сплавов после старения, исходный сплав (а), с добавкой 2,9 % КС25ДЦ (б) с добавкой 4,5 и 5,6 % КС25ДЦ (в); 8,8 % КС25ДЦ (г)

Таким образом, введение в сплав 22X15K4MC добавки KC25ДЦ в концентрациях 1,47–4,4 % способствует измельчению зерна и росту прочностных характеристик сплавов.

Каждый из элементов введенный в систему Fe-Cr-Co-Mo в составе добавки KC25ДЦ оказывает определенное влияние на структуру магнита. Согласно исследованиям [25; 26], Cu и Zr в магнитах KC25ДЦ способствуют закреплению доменных стенок, что затрудняет процессы перемагничивания и тем самым повышает  $H_c$ . Однако их количество в сплаве 22X15K4MC с добавкой очень мало, и скорее всего они не влияют на эти процессы. Zr и Fe играют роль в стабилизации фазы с ромбоэдрической кристаллической решеткой  $Sm_2Co_{17}$ . А вот избыток Fe, которого достаточно много в исходном сплаве (48,7–57,5 %), может приводить к замещению Co в фазе  $Sm_2Co_{17}$ , изменению ее стехиометрического

состава и снижению  $H_c$  и температуры Кюри магнитов. Это, вероятно, и происходит в процессе термической обработки. Вводимые в составе сплава KC25ДЦ фазы  $Sm_2Co_{17}$  и  $SmCo_5$  в систему Fe-Cr-Co-Mo обедняются по содержанию кобальта, однако обладают высокой магнитной анизотропией и могут увеличивать количество ферромагнитной фазы, тем самым повышая магнитную энергию сплава.

С повышением температуры нагрева температурный коэффициент коэрцитивной силы сплавов, содержащих добавку KC25ДЦ, изменяется немонотонно. При 60 °C повышение концентрации добавки KC25ДЦ в сплаве с 1,47 до 8,8 % приводит к снижению  $TК(H_c)$ . При температуре испытаний 80 °C  $TК(H_c)$  сплавов с добавкой в 1,5–2 раза выше  $TК(H_c)$  исходного сплава 22X15K4MC. При температуре 110°C наиболее стабильно показал себя сплав с 2,9 % KC25ДЦ при 150°C с 5,9 и 8,8 % KC25ДЦ (рис. 2).

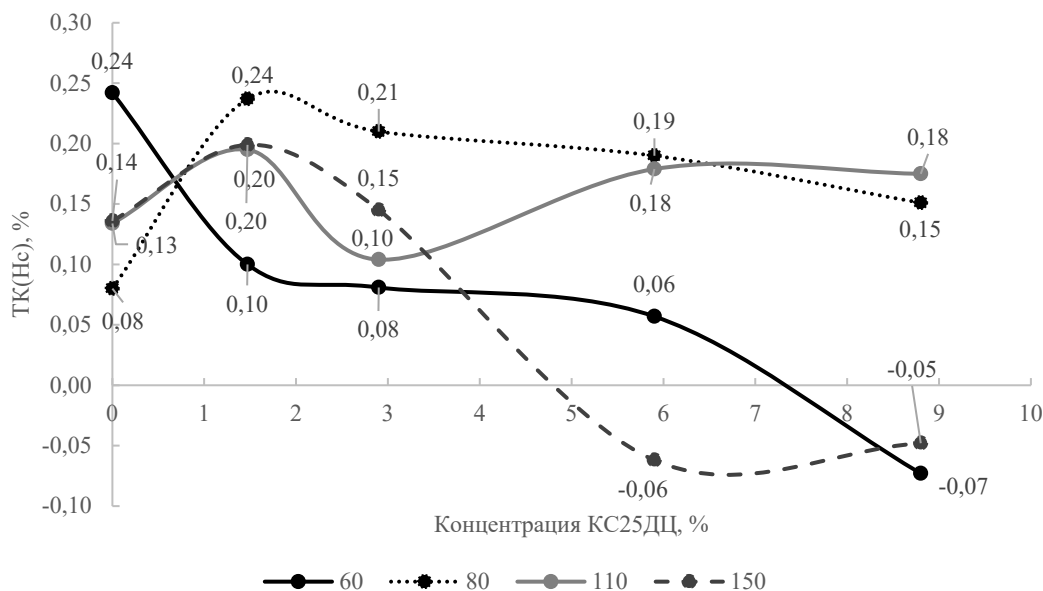


Рис. 2. Зависимость  $TК(H_c)$ , % от концентрации добавки сплава KC25ДЦ

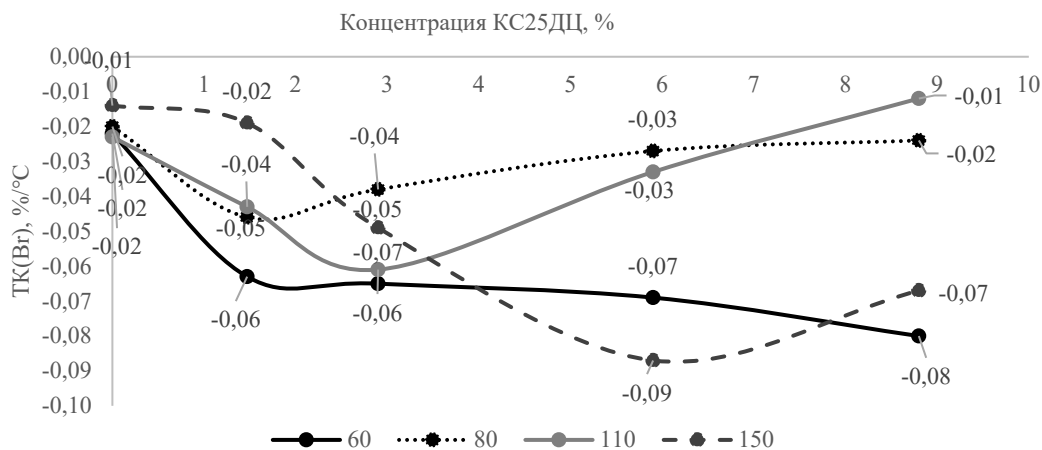


Рис. 3. Зависимость  $TК(B_r)$ , % от концентрации добавки сплава KC25ДЦ

При 60, 80, 150 °С наименьшее значение  $T_K(B_r)$  имел сплав 22Х15К4МС. При 110 °С минимальный  $T_K(B_r) = -0,012$  показал сплав с 8,8 % КС25ДЦ (рис. 3).

Температурный коэффициент магнитной энергии при 60 °С снижался с введением добавки КС25ДЦ, при остальных температурах нагрева увеличивался с повышением концентрации добавки КС25ДЦ до 5,9 % (рис. 4). Таким образом, добавка КС25ДЦ приводит к небольшому повышению температурных коэффициентов магнитной индукции и магнитной энергии, однако при некоторых температурах снижает  $T_K(H_c)$ . Согласно [27], величина  $T_K(H_c)$  для материалов системы Fe-Cr-Co,

примяемых при изготовлении деталей точных приборов, составляет 0,3–0,5 %/°С, установлено что полученные сплавы с концентрацией добавки от 1,47 до 2,9 % и от 5,9 до 8,8 % не только удовлетворяют этим требованиям, но и имеют еще более низкие значения температурного коэффициента коэрцитивной силы. Сплав с 4,4 % КС25ДЦ имел низкий уровень магнитных свойств и их стабильности, что связано с его структурным состоянием, для корректного отображения графиков данные по сплаву не вносились.

Согласно кривым ДСК исходного сплава 22Х15К4МС (рис. 5), сплава с добавкой КС25ДЦ в количестве 2,9 % (рис. 6) тепловые эффекты сплавов имели близкую динамику.

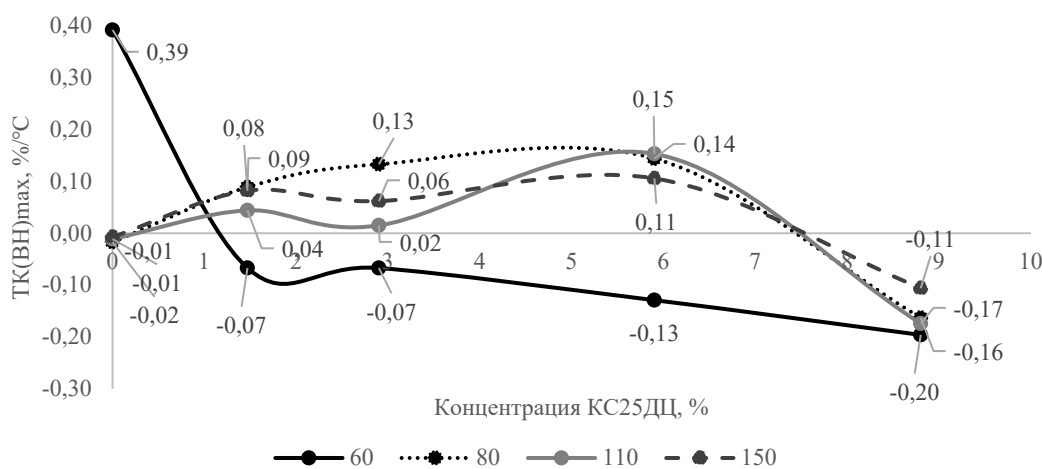


Рис. 4. Зависимость  $T_K((BH)_{max})$ , %, от концентрации добавки сплава КС25ДЦ

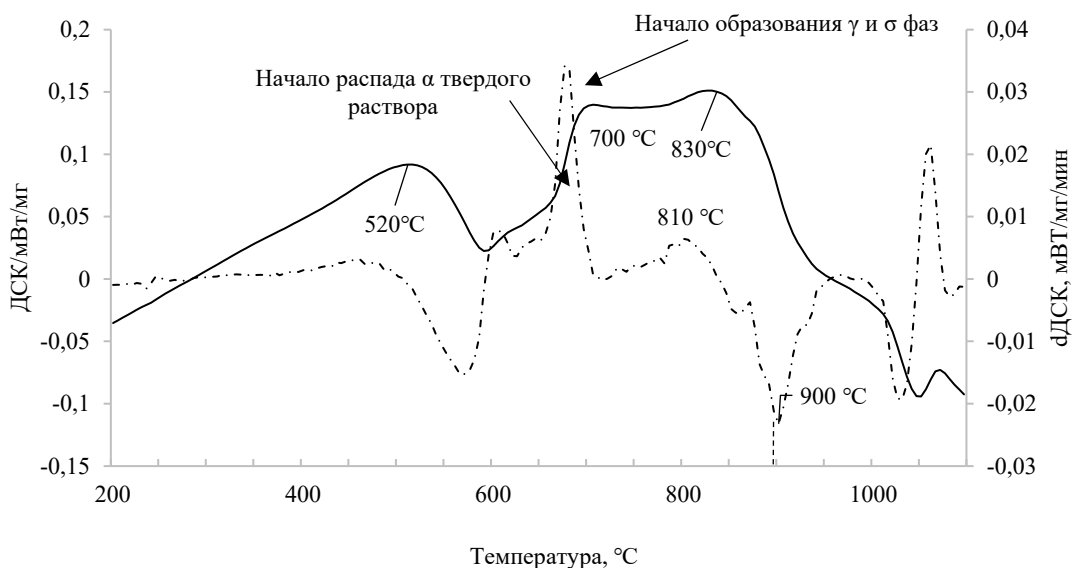


Рис. 5. Кривые ДСК при нагреве (сплошная) и  $dDSC$  (штрихпунктирная) сплава 22Х15К4МС при нагреве со скоростью 10 °С/мин



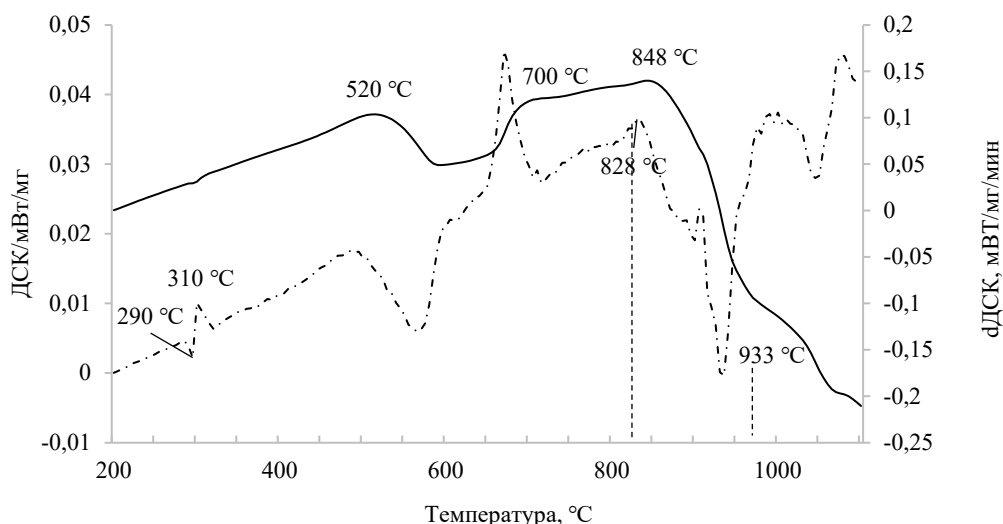


Рис. 6. Кривые ДСК при нагреве (сплошная) и  $dDCK$  (штрихпунктирная) сплава 22X15K4MC + 2,9 %KC25DЦ при нагреве со скоростью 10 °C/мин

Преобразования в обоих сплавах протекают в интервале 500–1100 °C. При температуре 500 °C в сплавах начинается спинодальный распад  $\alpha$ -фазы на сильномагнитную и слабомагнитную фазы, характеризующийся поглощением тепла. Интервал температур 555–600 °C относится к процессу максимального роста остаточной магнитной индукции магнитотвердых сплавов.

Таким образом, добавка сплава KC25DЦ не оказывает заметного влияния на кинетику превращений сплава и не влияет на его температуру Кюри, поэтому не привела к существенному росту ТК.

### Заключение

1. Повышение концентрации добавки приводит к росту пористости и снижению плотности сплава.

2. Добавка сплава KC25DЦ в концентрациях от 1,47 до 4,4 % способствует повышению прочностных характеристик сплава 22X15K4MC.

3. Влияние добавки сплава системы SmCo на стабильность магнитных свойств сплава системы Fe-Cr-Co-Mo имеет немонотонный характер. Добавка редкоземельного сплава повышает ТК(Br), что делает его менее стабильным. Однако при повышенных температурах испытаний 110 и 150 °C наиболее стабильную  $H_c$  имели сплавы с 2,9, 5,9 и 8,8 % KC25DЦ.

4. Сплавы 22X15K4MC с добавкой KC25DЦ в количестве от 1,47 до 2,9 % и от 5,9 до 8,8 % удовлетворяют требованиям по температурной стабильности для сплавов системы Fe-Cr-Co и имеют более низкие значения температурного коэффициента коэрцитивной силы.

### Библиографический список

1. Температурная стабильность редкоземельных магнитов, поддерживаемая с помощью магнитокалорического эффекта / Р.Б. Моргунов, В.П. Пискорский, Р.А. Валеев, Д.В. Королев // *Авиационные материалы и технологии*. – 2019. – № 1. – С. 88–93.
2. Подпорин, С.А. Системы курсоуказания современных шельфовых судов обеспечения / С.А. Подпорин, Э.Б. Велиев // *Вестник Севастопольского НТУ. Сер.: Механика, энергетика, экология*. – 2014. – Вып. 153. – С. 99–106.
3. Оптимизация содержания кобальта как способ температурной стабилизации редкоземельных магнитов / Р.А. Валеев, В.П. Пискорский, Д.В. Королев, Р.Б. Моргунов // *Труды ВИАМ*. – 2023. – № 3. – С. 58–66.
4. Каблов, Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Е.Н. Каблов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33.
5. Влияние содержания меди на фазовый состав и магнитные свойства термостабильных спеченных магнитов систем Nd-Dy-Fe-Co-B и Pr-Dy-Fe-Co-B / Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, И.В. Чередниченко, И.И. Резчикова, Р.А. Валеев, В.П. Пискорский // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № S2 (39). – С. 11–19.
6. Физика и инженерия постоянных магнитов / В.П. Пискорский [и др.]. – М., 2018.
7. Устойчивость редкоземельных SmCo магнитов к длительному хранению / Г.П. Станолевич [и др.] // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. – 2014. – Т. 139, № 2. – С. 29–34.
8. Синтез постоянных магнитов 25X15K и исследование их свойств в условиях эксплуатации в магнитных и термических полях / А.С. Жуков [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2023. – № 5. – С. 36–41.

9. Wang C., Zhu M.G. Overview of composition and technique process study on 2: 17-type Sm–Co high-temperature permanent magnet / C. Wang, M.G. Zhu // *Rare Metals*. – 2021. – Т. 40. – С. 790–798.

10. Liu, S. Sm<sub>2</sub>(Co, Fe, Cu, Zr)<sub>17</sub> magnets with higher Fe content / S. Liu, A.E. Ray // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1989. – Т. 25, № 5. – P. 3785–3787.

11. Highly Stable and Finely Tuned Magnetic Fields Generated by Permanent Magnet Assemblies / E. Danieli, J. Perlo, B. Blumich, F. Casanova // *Physical Review Letters*. – 2013. – Vol. 110. – P. 180801-1–180801-5.

12. Формирование физических свойств у магнитных материалов роторов высокоскоростных и сверхвысокоскоростных электромеханических преобразователей энергии / И.М. Миляев [и др.] // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2018. – Т. 82, № 8. – С. 1025–1029.

13. Витязь, П.А. Порошковая металлургия в Беларуси и в мире: тенденции развития и взаимное влияние / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, В.В. Савич // *Актуальные проблемы порошкового материаловедения*. – 2018. – С. 11–20.

14. Пат. № 2334589 РФ. МПК В22F 3/12. Способ изготовления магнитов из порошковых материалов на основе системы «железо – хром – кобальт» / Шацов А.А. № 2006136074/02; заявл. 11.10.2006; опубл. 20.04.08. – Бюл. № 27. – 5 с.

15. Fe–Cr–Co permanent magnet alloys containing Nb and Al / H. Kaneko [et al.] // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1975. – Vol. 11, no. 5. – P. 1440–1442.

16. Хренов, О.В. Материалы и технология порошковой металлургии: учеб. метод. пособ. изд. / О.В. Хренов, Л.Н. Афанасьев, А.В. Лешок. – Минск: БНТУ, 2010. – 37 с.

17. Effects of Sm on structural, textural and magnetic properties of Fe<sub>2</sub>8Cr<sub>20</sub>Co<sub>3</sub>Mo<sub>2</sub>Ve<sub>2</sub>Ti hard magnetic alloy / Shan Tao, Zubair Ahmad, Pengyue Zhang a, Xiaomei Zheng, Suyin Zhang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 816. – P. 152619.

18. Пат. № 2022104988 РФ. Способ термической обработки порошкового магнитотвердого сплава Fe–30Cr–16Co–0,5Sm / И.М. Миляев, М.И. Алымов, А.И. Миляев [и др.], опубл. 25.02. 2022.

19. Бельтюкова, М.А. Роль добавки КС25ДЦ в формировании микроструктуры и магнитных свойств сплава на основе системы Fe–Cr–Co–Mo / М.А. Бельтюкова, А.А. Шацов // *Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении»*, г. Пермь, 23–27 октября 2023 г. – Пермь: Пермский национальный исследовательский университет, 2023. – С. 22–27.

20. Мариева, М.А. Влияние добавки самария на кинетику превращений и гистерезисные свойства порошкового магнитотвердого сплава на основе системы Fe–Cr–Co–Mo / М.А. Мариева, А.А. Шацов, В.А. Козвонин // *Сборник материалов конференции 76-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: в 3 ч. 19–20 апреля 2023 г.*, Ярославль. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2023. – Ч. 2. – 796 с.

21. ГОСТ 21559-76. Материалы магнитотвердые спеченные. Марки. – Введ. 01.07.1997. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 36 с.

22. Phase relations in the samarium-poor Sm–Co–Fe system / G. Schneider [et al.] // *Journal of the Less Common Metals*. – 1985. – Vol. 110, no. 1–2. – P. 159–170.

23. Постоянные магниты: справочник / под ред. Ю.М. Пятин. – М.: Энергия, 1971. – 486 с.

24. Influence of the total porosity on the properties of sintered materials – A review / F. Ternero, L.G. Rosa, P. Urban, J.M. Montes, F.G. Cuevas // *Metals*. – 2021. – Vol. 11, no. 5. – P. 1–21.

25. Ray, A.E. Metallurgical behavior of Sm (Co, Fe, Cu, Zr) z alloys / A.E. Ray // *Journal of applied physics*. – 1984. – Vol. 55, no. 6. – P. 2094–2096.

26. ГОСТ 25281-82. Металлургия порошковая. Метод определения плотности формовок. – Введ. 06.08.1983. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 10 с.

27. Винтайкин, Б.Е. О температурной стабильности гистерезисных свойств магнитно-твердых сплавов на Fe–Cr–Co основе / Б.Е. Винтайкин, М.А.Либман, Н.Н. Потапов // *Физика металлов и металловедение*. – 1991. – № 6. – С. 104.

## References

1. Morgunov R.B., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Korolev D.V. Temperaturnaya stabil'nost' redkozemel'nykh magnetov, podderzhivaemaia s pomoshch'iu magnitokaloricheskogo effekta [Temperature stability of rare-earth magnets supported by the magnetocaloric effect]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no.1, pp. 88–93.

2. Podporin S.A., Veliev E.B. Sistemy kursoukazaniia sovremennykh shel'fovykh sudov obespecheniia [Course guidance systems of modern offshore support vessels]. *Vestnik Sevastopol'skogo NTU. Ser.: Mekhanika, energetika, ekologiya*, 2014, iss. 153, pp. 99–106.

3. Valeev R.A., Piskorskii V.P., Korolev D.V., Morgunov R.B. Optimizatsiia soderzhaniia kobal'ta kak sposob temperaturnoi stabilizatsii redkozemel'nykh magnetov [Optimization of cobalt content as a way of temperature stabilization of rare-earth magnets]. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3, pp. 58–66.

4. Kablov E.N. Innovatsionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNTs RF po realizatsii «Strategicheskikh napravlenii razvitiia materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative developments of FSUE “VIAM” State Research Center of the Russian Federation on realization of “Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period up to 2030”]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no.1 (34), pp. 3–33.

5. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Cherednichenko I.V., Rezchikova I.I., Valeev R.A., Piskorskii V.P. Vliianie soderzhaniia medi na fazovyi sostav i magnitnye svoistva termostabil'nykh spechennykh magnetov sistem Nd–Dy–Fe–Co–B i Pr–Dy–Fe–Co–B [Influence of copper content on phase composition and magnetic properties of thermostable sintered magnetites of Nd–Dy–Fe–Co–B and Pr–Dy–Fe–Co–B systems]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. S2 (39), pp. 11–19.

6. Piskorskii V. P. et al. Fizika i inzheneriia postoiannykh magnetov [Physics and engineering of permanent magnets], 2018.



7. Stanolevich G. P. et al. Ustoichivost' redkozemel'nykh SmCo magnitov k dlitel'nomu khraneniui [Stability of rare-earth SmCo magnets to long-term storage]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM*, 2014, vol. 139, no. 2, pp. 29-34.

8. Zhukov A. S. i dr. Sintez postoiannykh magnitov 25Kh15K i issledovanie ikh svoystv v usloviakh ekspluatatsii v magnitnykh i termicheskikh poliakh [Synthesis of permanent magnets 25X15K and study of their properties under operating conditions in magnetic and thermal fields]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 2023, no. 5, pp. 36-41.

9. Wang C., Zhu M. G. Overview of composition and technique process study on 2: 17-type Sm–Co high-temperature permanent magnet. *Rare Metals*, 2021, vol. 40, pp. 790-798.

10. Liu S., Ray A. E. Sm  $\alpha$ (Co, Fe, Cu, Zr)<sub>17</sub> magnets with higher Fe content. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1989, vol. 25, no. 5, pp. 3785-3787.

11. Danieli E., Perlo J., Blumich B., Casanova F. Highly Stable and Finely Tuned Magnetic Fields Generated by Permanent Magnet Assemblies. *Physical Review Letters*, 2013, vol. 110, pp. 180801-1–180801-5.

12. Miliaev I.M. i dr. Formirovanie fizicheskikh svoystv u magnitnykh materialov rotorov vysokoskorostnykh i sverkhvysokoskorostnykh elektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii [Formization of physical properties of magnetic materials of rotors of high-speed and ultra-high-speed electromechanical energy converters]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Seriiia fizicheskaiia*, 2018, vol. 82, no. 8, pp. 1025-1029.

13. Vitiaz' P. A., Il'iuschenko A. F., Savich V. V. Poroshkovaia metallurgiiia v Belarusi i v mire: tendentsii razvitiia i vzaimnoe vliianie [Powder metallurgy in Belarus and in the world: development trends and mutual influence]. *Aktual'nye problemy poroshkovogo materialovedeniia*, 2018, pp. 11-20.

14. Shatsov A.A. Sposob izgotovleniia magnitov iz poroshkovykh materialov na osnove sistemy zhelezo-khrom-kobal't [Method of manufacturing magnets from powder materials based on iron-chromium-cobalt system]. Patent Rossiiskaiia Federatsiia no. 2006136074/02 (2008).

15. Kaneko H. et al. Fe–Cr–Co permanent magnet alloys containing Nb and Al. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1975, vol. 11, no. 5, pp. 1440-1442.

16. Khrenov O.V., Afanas'ev L.N., Leshok A.V. Materialy i tekhnologiiia poroshkovoi metallurgii [Materials and technology of powder metallurgy]. Minsk: BNTU, 2010, 37p.

17. Shan Tao, Zubair Ahmad, Pengyue Zhang a, Xiaomei Zheng, Suyin Zhang. Effects of Sm on structural, textural and magnetic properties of Fe<sub>28</sub>Cr<sub>20</sub>Co<sub>3</sub>Mo<sub>2</sub>Ve<sub>2</sub>Ti hard magnetic alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 816, pp. 152619.

18. Miliaev I.M., Alymov M.I., Miliaev A.I. et al. Sposob termicheskoi obrabotki poroshkovogo magnitotverdого сплава fe-30cr-16co-0,5sm [Method of heat treatment of powdered magnetic-hard alloy Fe-30Cr-16Co-0.5Sm]. Patent 8 Rossiiskaiia Federatsiia no. 202210498 (2022).

19. Bel'tiukova M.A., Shatsov A.A. Rol' dobavki KS25DTs v formirovani mikrostruktury i magnitnykh svoystv сплава na osnove sistemy Fe-Cr-Co-Mo [Role of KC25DC additive in the formation of microstructure and magnetic properties of the Fe-Cr-Co-Mo based alloy]. *Materialy VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem Innovatsionnye tekhnologii v materialovedenii i mashinostroenii*, 2023, pp. 22-27.

20. Marieva M.A., Shatsov A.A., Kozvonin V.A. Vliianie dobavki samariia na kinetiku prevrashchenii i gisterizisnye svoystva poroshkovogo magnitotverdого сплава na osnove sistemy FE-CR-CO-MO [Influence of samarium addition on transformation kinetics and hysteresis properties of

powder magnetically hard alloy based on FE-CR-CO-MO system]. *Sbornik materialov konferentsii 76 vserossiiskaiia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia studentov, magistrantov i aspirantov s mezhdunarodnym uchastiem*. Iaroslavl': Izdatel'stvo IaGTU, 2023, 796 p.

21. GOST 21559-76 Materialy magnitotverdые spechennye. Marki [Magnetically hard sintered materials. Marks]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1976, 36 p.

22. Schneider G. et al. Phase relations in the samarium-poor Sm-Co-Fe system. *Journal of the Less Common Metals*, 1985, vol. 110, no. 1-2, pp. 159-170.

23. Postoiannye magnity: Spravochnik [Permanent magnets: reference book]. Ed. Iu.M. Piatina. Moscow: Energiia. 1971, 486 p.

24. Ternero F., Rosa L.G., Urban P., Montes J.M., Cuevas F.G. Influence of the total porosity on the properties of sintered materials – A review. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 1-21.

25. Ray A.E. Metallurgical behavior of Sm (Co, Fe, Cu, Zr)  $\alpha$  alloys. *Journal of applied physics*, 1984, vol. 55, no. 6, pp. 2094-2096.

26. GOST 25281-82 Metallurgiiia poroshkovaiia. Metod opredeleniia plotnosti formovok [Powder metallurgy. Method for determination of density of molds]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1983, 10 p.

27. Vintaikin B.E., Libman M.A., Potapov N.N. O temperaturnoi stabil'nosti gisterizisnykh svoystv magnitotverdyykh splavov na Fe-Cr-Co osnove [On temperature stability of hysteresis properties of Fe-Cr-Co-based magnetic-hard alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1991, no. 6, pp. 104.

Поступила: 07.09.2023

Одобрена: 23.12.2023

Принята к публикации: 13.05.2024

### Об авторах

**Бельтюкова Мария Александровна** (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры металловедение, термическая и лазерная обработка металлов ПНИПУ (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: marievamar@rambler.ru).

**Оглезнева Светлана Аркадьевна** (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механика композиционных материалов и конструкций ПНИПУ (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ogleznevasa@pstu.ru).

### About the authors

**Maria A. Beltyukova** (Perm, Russian Federation) – post-graduate student of the Department of Metallurgy, Thermal and Laser Processing of Metals of Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: marievamar@rambler.ru).

**Svetlana A. Oglezneva** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanics of Composite Materials and Structures of Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ogleznevasa@pstu.ru).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценен.