

**Аспирант 3 года обучения Шитов Александр Владимирович
лаборатории ферромагнитных сплавов**

Научный руководитель – к.ф.-м.н. Головня Оксана Александровна

Специальность 01.04.11 – Физика магнитных явлений

Тема работы – Исследование методов повышения магнитных характеристик спеченных магнитов, изготовленных из сплавов (Nd,Dy)-(Fe,Co)-B

Задача текущего года

Исследование температурной стабильности магнитов (Nd,Pr)-(Fe,Co,Cu,Ga)-B

Результаты, полученные в текущем году

1. Из двух сплавов с составами $(\text{Nd,Dy})_{31,2}\text{Fe}_{\text{ост.}}\text{Co}_{1,0}\text{Cu}_{0,1}\text{Ga}_{0,1}\text{B}_{0,9}$ и $(\text{Nd,Pr})_{31,9}\text{Fe}_{\text{ост.}}(\text{Co,Cu,Ga})_{1,5}\text{B}_{0,8}$ по низкокислородной технологии изготовлены спеченные магниты. 2. Исследованы основные магнитные характеристики спеченных магнитов при комнатной и повышенной до 120 °С температурах, рассчитаны температурные коэффициенты остаточной индукции и коэрцитивной силы. 3. Установлено, что магниты с составом $(\text{Nd,Pr})_{31,9}\text{Fe}_{\text{ост.}}(\text{Co,Cu,Ga})_{1,5}\text{B}_{0,8}$ в интервале температур 23 °С - 120 °С имеют меньший по модулю температурный коэффициент коэрцитивной силы по сравнению с магнитами состава $(\text{Nd,Dy})_{31,2}\text{Fe}_{\text{ост.}}\text{Co}_{1,0}\text{Cu}_{0,1}\text{Ga}_{0,1}\text{B}_{0,9}$.

**Аспирант 3 года обучения Шитов Александр Владимирович
лаборатории ферромагнитных сплавов**

Апробация работы

Статьи

1. А. Г. Попов, Д. Ю. Василенко, А. В. Шитов, Т.З. Пузанова, А. В. Власюга, Влияние диффузионного отжига на гистерезисные свойства спеченных магнитов Nd-Fe-B // Физика металлов и металловедение — 2011. — №5. — с. 493—501. (**Web of Science**)
2. А.Г. Попов, Е.Г. Герасимов, Д.Ю. Василенко, А. В. Шитов, М.Ю. Говорков, Д.Ю. Братушев, В.П. Вяткин, К.Ю. Шуняев, Т.Л. Михайлова, Получение спеченных магнитов Nd-Fe-B без процесса прессования порошков // Физика металлов и металловедение — 2012. — №4. — с. 352. (**Web of Science**)
3. Д.Ю. Василенко, А.В. Шитов, А.В. Власюга, А.Г. Попов, Н.В. Кудреватых, Н.В. Печищева, Микроструктура и свойства сплавов состава Nd-Fe-B, полученных методом «Strip Casting», и изготовленных из них постоянных магнитов // Металловедение и термическая обработка. — 2014. — №11 — с. 10—16. (**Web of Science**)

**Аспирант 3 года обучения Шитов Александр Владимирович
лаборатории ферромагнитных сплавов**

Апробация работы

Статьи

- 4 А. Г. Попов, Д. А. Колодкин, В. С. Гавико, Д. Ю. Василенко, А. В. Шитов, А. В. Власюга, М. Ю. Говорков, Д. Ю. Братушев. Высокоэнергетические магниты (Nd,Dy)-(Fe,Co)-В с пониженным температурным коэффициентом индукции// Физика металлов и металловедение — 2017. — №10. — с. 935—945. ([Web of Science](#))
- 5 Д. Ю. Василенко, Д.Ю. Братушев, А. В. Шитов, А. Г. Попов, Д. А. Колодкин. Структура и свойства постоянных магнитов R-(Fe,Co)-В (R – Nd,Dy,Ho) с низким температурным коэффициентом индукции // Металловедение и термическая обработка. — 2018. — №8. — с. 42—44. ([Web of Science](#))
- 6 Д.Ю. Василенко, Д.Ю. Братушев, А.В. Шитов, Д.А. Колодкин, А.Г. Попов. Управление свойствами магнитов Sm-Co-Fe-Cu-Zr методом смеси порошков // Металловедение и термическая обработка. — 2021. — №9-10 — с. 560—565. ([Web of Science](#))

**Аспирант 3 года обучения Шитов Александр Владимирович
лаборатории ферромагнитных сплавов**

Апробация работы

Статьи

- 7 Д. Ю. Василенко, А. В. Шитов, Д. Ю. Братушев, К. И. Подкорытов, В. С. Гавико, О.А. Головня, А. Г. Попов. Магнитные гистерезисные свойства и микроструктура высокоэнергоемких магнитов (Nd,Dy)-Fe-B с низким содержанием кислорода// Физика металлов и металловедение — 2022. — том 122, №12. — с. 1261—1270. ([Web of Science](#))
- 8 Д. Ю. Василенко, А. В. Шитов, А. Г. Попов, В. С. Гавико, Д. Ю. Братушев, К. И. Подкорытов, О.А. Головня,. Магнитные гистерезисные свойства и микроструктура высококоэрцитивных магнитов (Nd,Dy)-Fe-B с концентрацией Dy до 10 вес.% и низким содержанием кислорода// Физика металлов и металловедение — 2022. — том 123, №2. — с. 158—168. ([Web of Science](#))

**Аспирант 3 года обучения Шитов Александр Владимирович
лаборатории ферромагнитных сплавов**

Апробация работы

Статьи

- 9 А. В. Протасов, А. Г. Попов, А.С. Волегов, В.С. Гавико, А. В. Шитов, О.А. Головня. Микроструктура и магнитные свойства сплава $(\text{Sm,Zr})(\text{Fe,Co})_{10,3}\text{Ti}_{0,7}$ // Физика металлов и металловедение — 2023. — том 124, №1. — с. 17-23 (**Web of Science**)
- 10 О. А. Головня, К. А. Кручинина, А. В. Протасова, Д. А. Колодкин, А. В. Шитов, Л. А. Сташкова, А. В. Огурцов, Д. В. Таранов. Применение активированного измельчения порошков при изготовлении магнитов Nd-Fe-B методом PLP // Физика металлов и металловедение — 2023. — том 124, №5. (**Web of Science**)

**Аспирант 3 года обучения Шитов Александр Владимирович
лаборатории ферромагнитных сплавов**

Апробация работы

Тезисы докладов на международных конференциях

1. Д.Ю. Василенко, М.Ю. Говорков, В.П. Вяткин, А.В. Власюга, А.В. Шитов, А.Г. Попов, Н.В. Печищева. Исследование микроструктуры и свойств сплавов Nd-Fe-B типа Strip Casting и получаемых из них постоянных магнитов. Сборник материалов XIX международной конференции по постоянным магнитам. Суздаль, 2013. с.126-127.
2. Д.Ю. Василенко, М.Ю. Говорков, В.П. Вяткин, А.В. Шитов, А.Г. Попов. Получение высококоэрцитивных магнитов (Nd,Dy)-Fe-B по низкокислородной технологии. Сборник материалов XX международной конференции по постоянным магнитам. Суздаль, 2015. с.92-93.
3. Д.Ю. Василенко, М.Ю. Говорков, Д.Ю. Братушев, А.В. Шитов, Д.А. Колодкин, А.Г. Попов. Высокоэнергоемкие постоянные магниты (Nd,Dy)-Fe-B с рабочей температурой до 180°C. Сборник материалов XXI международной конференции по постоянным магнитам. Суздаль, 2017.
4. Д.Ю. Василенко, Д.Ю. Братушев, А.В. Шитов, Д.А. Колодкин, А.Г. Попов. Управление свойствами магнитов Sm-Co-Fe-Cu-Zr методом смеси порошков. Сборник материалов XXII международной конференции по постоянным магнитам. Суздаль, 2019. с.108-109.

**Аспирант 3 года обучения Шитов Александр Владимирович
лаборатории ферромагнитных сплавов**

Апробация работы

Тезисы докладов на международных конференциях

5. A.V. Shitov, O.A. Golovnya, V.S. Gaviko, A.G. Popov, D.Yu. Vasilenko. STUDY OF ALIGNMENT DEGREE OF Nd-Dy-Fe-B SINTERED MAGNETS BY DIFFERENT METHODS. Eastmag 2022. Abstracts, Volume 2, p.253

6. O.A. Golovnia, L.A. Stashkova, A.V. Protasov, A.V. Ogurtsov, M.K. Sharin, A.G. Popov, K.A. Kruchinina, A.V. Shitov. PHASE TRANSITIONS UPON SINTERING OF ND-DY-FE-B POWDERS STUDIED BY IN-SITU DSC. Eastmag 2022. Abstracts, Volume 2, p.223

7. A.V. Protasov, O.A. Golovnia, A.G. Popov, A.S. Volegov, V.S. Gaviko, A.V. Shitov MICROSTRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF STRIP-CASTED (Sm,Zr)(Fe,Co)₁₀Ti_{0,7} ALLOY. Eastmag 2022. Abstracts, Volume 2, p.243

8. О.А. Головня, А.В. Протасов, Д.А. Колодкин, А.Г. Попов, К.А. Кручинина, А.В. Шитов, Д.В. Таранов, А.В. Огурцов, М.К. Шарин. Применение активированного измельчения порошков при изготовлении магнитов Nd-Fe-B методом PLP. Сборник материалов XXI международной конференции по постоянным магнитам. Суздаль, 2022. с.94.

**Аспирант 3 года обучения Шитов Александр Владимирович
лаборатории ферромагнитных сплавов**

Тезисы докладов на российских конференциях

1. Д.Ю. Василенко, М.Ю. Говорков, Д.Ю. Братушев, А.В. Шитов, Д.А. Колодкин, А.Г. Попов. Высокоэнергетические магниты (Nd,Dy)-(Fe,Co)-В с пониженным температурным коэффициентом индукции. Сборник материалов конференции ФНМ2016 Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества. Суздаль, 2016. с.56.
2. Д.Ю. Василенко, Д.Ю. Братушев, А.В. Шитов, Д.А. Колодкин, А.Г. Попов. Влияние технологических параметров на магнитные гистерезисные свойства спеченных магнитов Sm-Fe-Co-Cu-Zr с содержанием железа до 20 вес.%. Сборник материалов конференции ФНМ2018 Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества. Суздаль, 2018.
3. Д.Ю. Василенко, А.В. Шитов, Д.Ю. Братушев, М.Ю. Говорков, О.А. Головня, А.Г. Попов. Магнитные свойства магнитов Sm-Co-Fe-Cu-Zr с низким содержанием кислорода. Сборник материалов конференции ФНМ2020 Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества. Суздаль, 2020. с.23.

**Аспирант 3 года обучения Шитов Александр Владимирович
лаборатории ферромагнитных сплавов**

Экзамены

Экзамен по истории философии и науки

Сдан – «Отлично»

Экзамен по иностранному языку

Сдан – «Отлично»

Экзамен по специальности 01.04.11

Июнь 2024 года

Зачет по методологии преподавания в высшей школе

Сдан – «Зачтено»

Участие в грантах

Нет

Выступления на конференциях

Сделано докладов

устных – 7

стендовых – 1

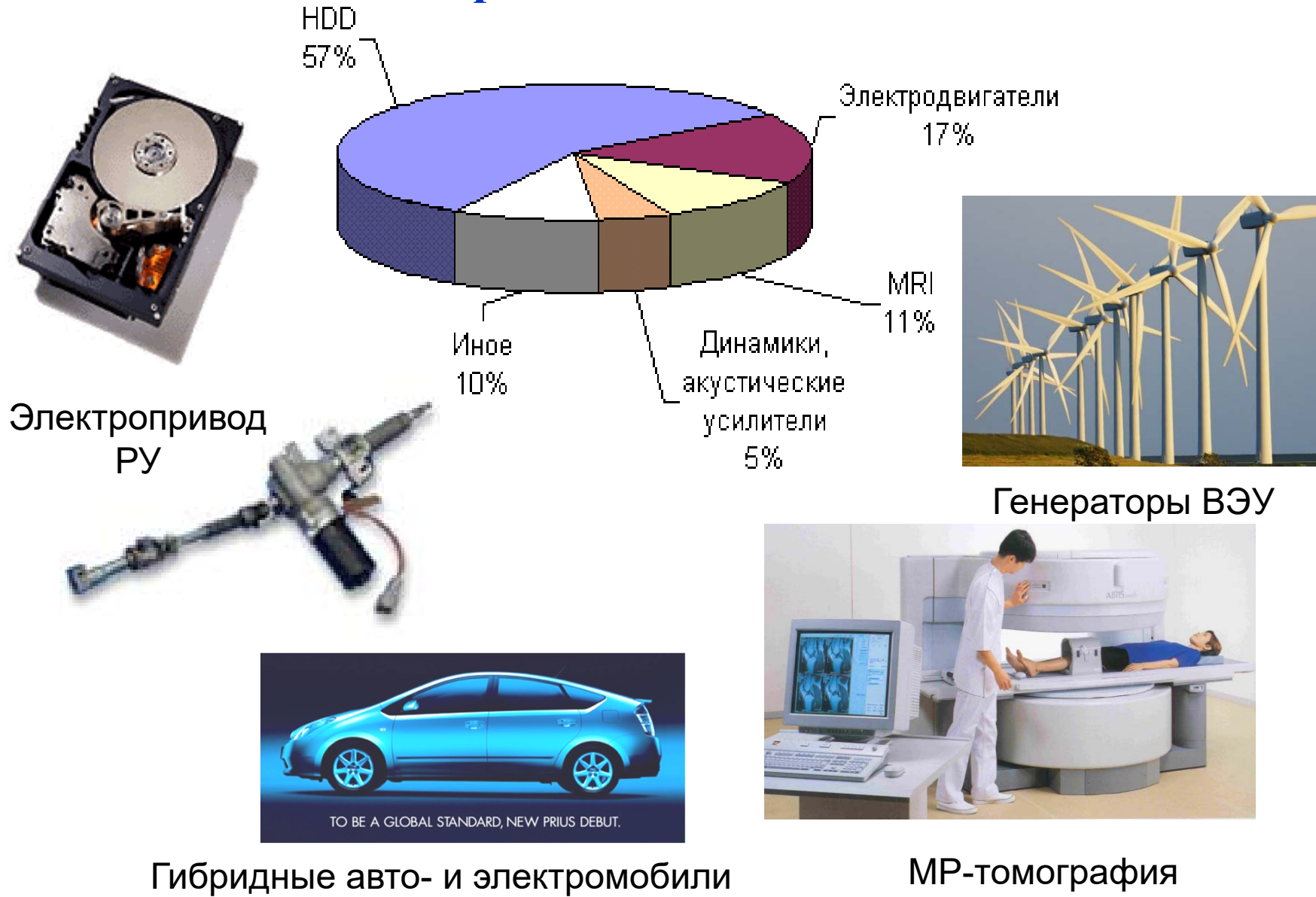
Аспирант 3 года обучения Шитов Александр Владимирович
лаборатория ферромагнитных сплавов

Таблица показателей

Показатель	Баллы	Кол-во 2021- 2022	Кол-во 2023	Сумма
публикации в изданиях ВАК (вышедшие из печати)	20	8	2	200
публикации в изданиях ВАК (принятые в печать)	5	0	0	0
патент	20	1	0	20
соавторство в монографии	5	0	0	0
оформленное ноу-хау	5	0	0	0
публикации в других изданиях (не тезисы)	2	0	0	0
тезисы доклада на международной конференции	5	4	4	40
тезисы доклада на российской конференции	3	3	0	9
участие в конференции с устным докладом	2	7	0	14
участие в конференции со стендовым докладом	1	0	1	1
сданный на «отлично» кандидатский экзамен	20	2	0	40
сданный на «хорошо» кандидатский экзамен	15	0	0	0
сданный на «удовлетворительно» кандидатский экзамен	10	0	0	0
участие в грантах в качестве: исполнителя	5	0	0	0
участие в грантах в качестве: руководителя	10	0	0	0
Общая сумма баллов	-	263	-	324

**Исследование температурной стабильности
магнитов (Nd,Pr)-(Fe,Co,Cu,Ga)-В без тяжелых
редкоземельных элементов**

Основные применения магнитов Nd-Fe-B



Требования к магнитам для генераторов ВЭУ



Генераторы ВЭУ

$$B_r \geq 12.8 \text{ кГс}$$

$$H_c \geq 17 \text{ кЭ}$$

$$\alpha \leq |-0.11| \text{ \%/ } ^\circ\text{C}$$

$$\beta \leq |-0.65| \text{ \%/ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{раб}} = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Требования к магнитам для генераторов ВЭУ



Генераторы ВЭУ

$$B_r \geq 12.8 \text{ кГс}$$

$$H_c \geq 17 \text{ кЭ}$$

$$\alpha \leq |-0.11| \text{ \%/}^\circ\text{C}$$

$$\beta \leq |-0.65| \text{ \%/}^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{раб}} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$$

Dy

Требования к магнитам для генераторов ВЭУ



Генераторы ВЭУ

$$B_r \geq 12.8 \text{ кГс}$$

$$H_c \geq 17 \text{ кЭ}$$

$$\alpha \leq |-0.11| \text{ \%/ } ^\circ\text{C}$$

$$\beta \leq |-0.65| \text{ \%/ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{раб}} = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dy
Pr, Ga*

*Q. Huang et al., Enormous improvement of the coercivity if Ga and Cu co-doping Nd-Fe-B sintered magnet by post-sinter annealing //Journal of Alloys and Compounds – 894 (2022) – 162418.

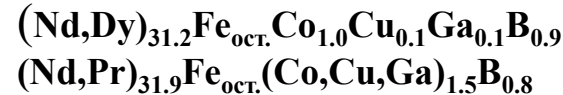
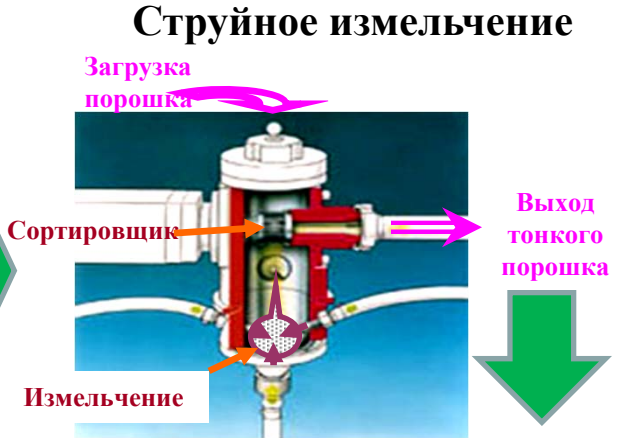
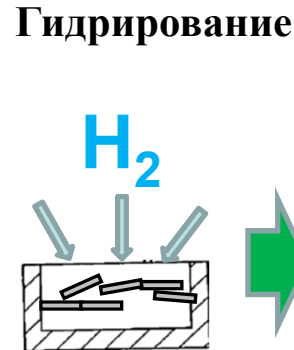
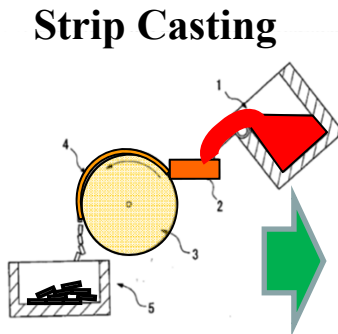
Цели

1) Изготовить по низкокислородной технологии магниты из двух сплавов $(\text{Nd,Dy})_{31.2}\text{Fe}_{\text{ост.}}\text{Co}_{1.0}\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{0.9}$ и $(\text{Nd,Pr})_{31.9}\text{Fe}_{\text{ост.}}(\text{Co,Cu,Ga})_{1.5}\text{B}_{0.8}$

2) Измерить основные магнитные характеристики изготовленных магнитов при комнатной температуре и при 120 °С (*рабочая температура генераторов ВЭУ*).

3) Оценить температурную стабильность магнитов с Dy и без тяжелых редкоземельных элементов (*рассчитать температурные коэффициенты остаточной индукции и коэрцитивной силы в диапазоне температур 23 – 120 °С*)

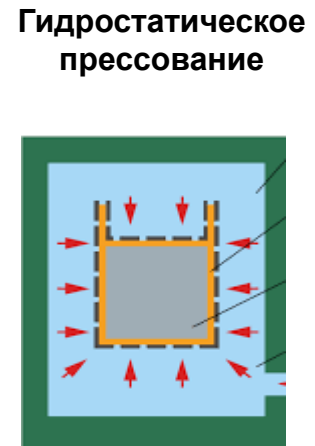
Низкокислородная технология изготовления магнитов



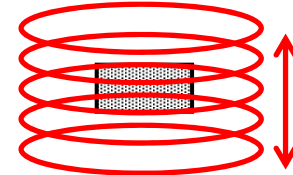
$D \sim 3.7 \text{ мкм}$



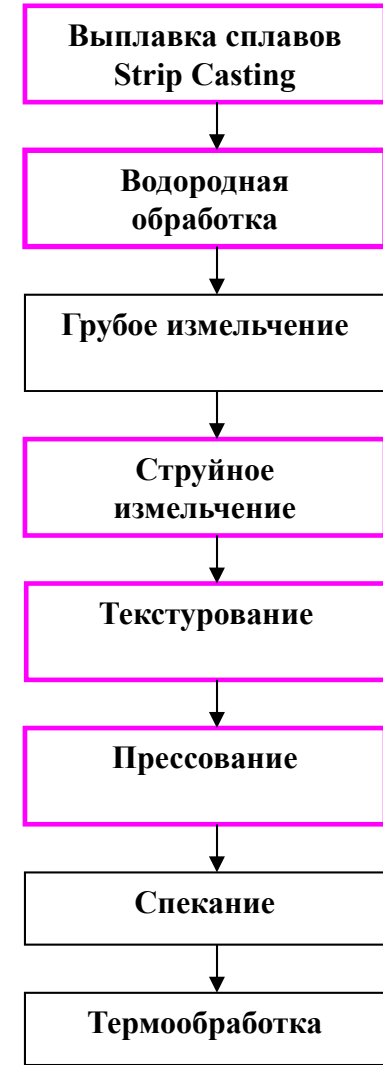
Термообработка
 T1 = 880°C, 1ч
 T2 = 480-510°C, 2ч



Текстурирование
 импульсным
 магнитным полем



Магнитное поле
 4 Тл

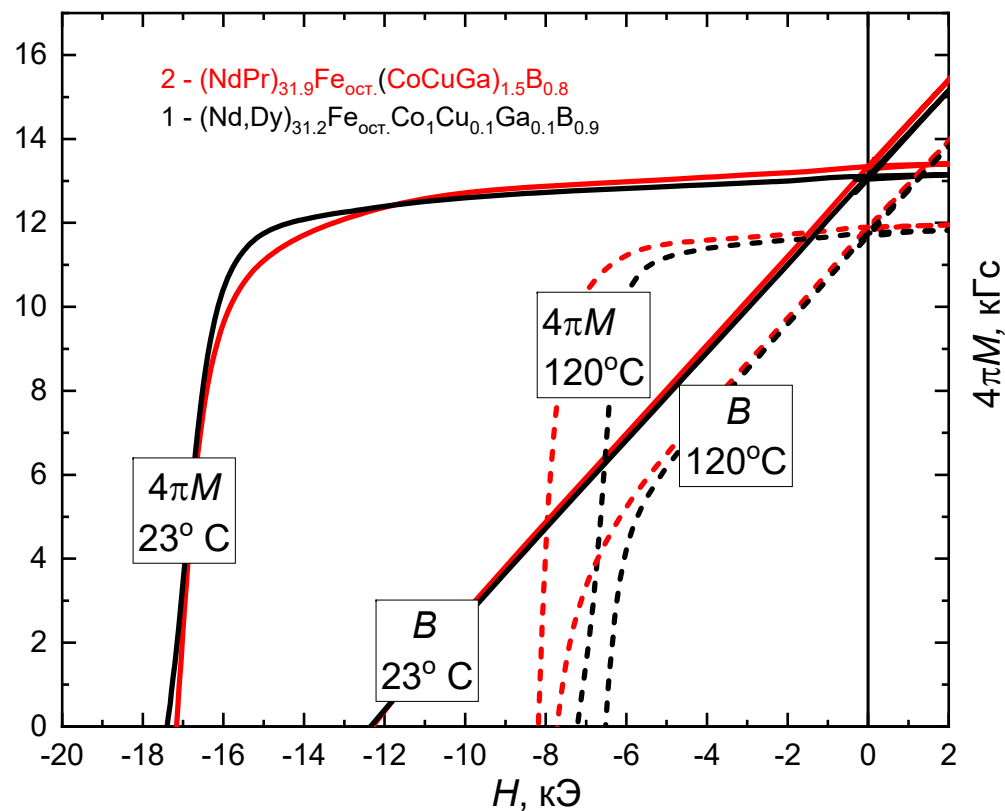


Методика эксперимента

- Измерение гистерезисных характеристик на установке **Permagraph_L** при комнатной и повышенной до 120 °С температурах (УЭМЗ)
- Расчет температурных коэффициентов α и β для диапазона температур 23 °С - 120 °С

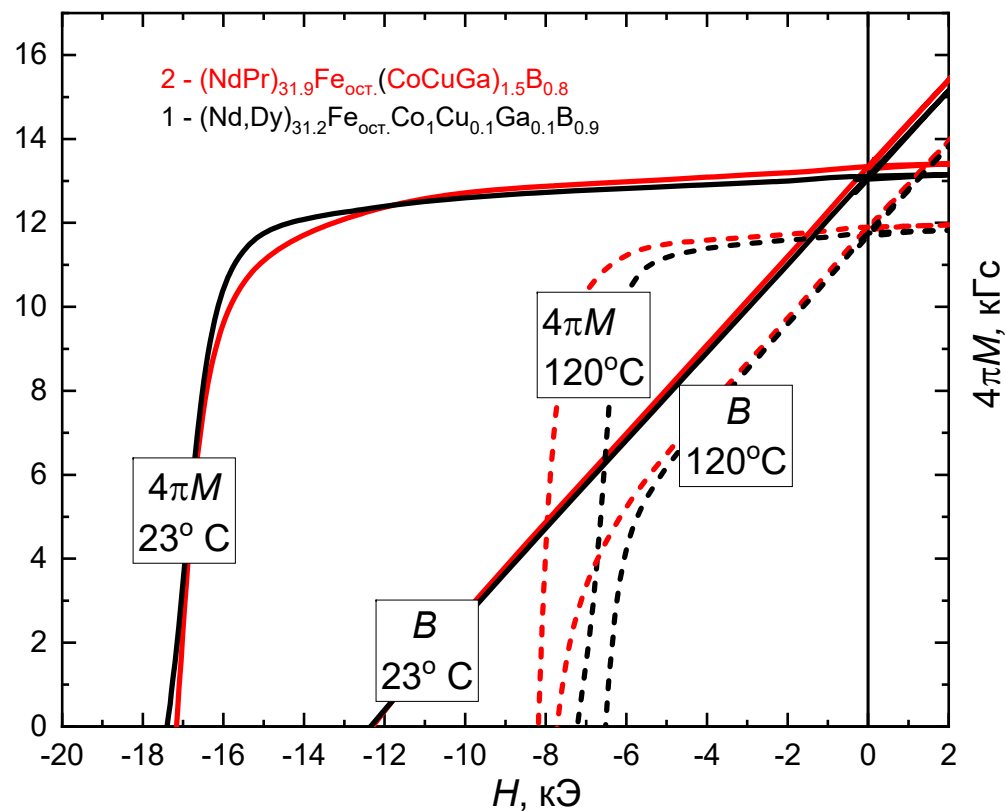
Результаты

Определение основных магнитных характеристик



Состав сплавов, вес. %	B_r , кГс	H_c , кЭ	$(BH)_{\text{max}}$, МГс*Э
$(\text{Nd,Dy})_{31.2}\text{Fe}_{\text{ост.}}\text{Co}_1\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{0.9}$	13.0	17.6	40.6
$(\text{Nd.Pr})_{31.9}\text{Fe}_{\text{ост.}}(\text{CoCuGa})_{1.5}\text{B}_{0.8}$	13.1	17.5	40.9

Определение основных магнитных характеристик



Состав сплавов, вес. %	B_r , кГс	H_c , кЭ	$(BH)_{\text{max}}$, МГс*Э
$(\text{Nd,Dy})_{31.2}\text{Fe}_{\text{oct.}}\text{Co}_1\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{0.9}$	13.0	17.6	40.6
$(\text{Nd.Pr})_{31.9}\text{Fe}_{\text{oct.}}(\text{CoCuGa})_{1.5}\text{B}_{0.8}$	13.1	17.5	40.9

Требования к генераторам ВЭУ

$$B_r \geq 12.8 \text{ кГс}$$

$$H_c \geq 17 \text{ кЭ}$$

Расчет температурных коэффициентов

$$\alpha = \frac{B_r(120) - B_r(23)}{120 - 23} \cdot 100\%$$

$$\beta = \frac{H_c(120) - H_c(23)}{120 - 23} \cdot 100\%$$

Состав сплавов, вес. %	α , %/°C	β , %/°C
$(\text{Nd,Dy})_{31.2}\text{Fe}_{\text{ост.}}\text{Co}_1\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{0.9}$	-0.11	-0.60
$(\text{Nd.Pr})_{31.9}\text{Fe}_{\text{ост.}}(\text{CoCuGa})_{1.5}\text{B}_{0.8}$	-0.11	-0.54

Расчет температурных коэффициентов

$$\alpha = \frac{B_r(120) - B_r(23)}{120 - 23} \cdot 100\%$$

$$\beta = \frac{H_c(120) - H_c(23)}{120 - 23} \cdot 100\%$$

Состав сплавов, вес. %	α , %/°С	β , %/°С
$(\text{Nd,Dy})_{31.2}\text{Fe}_{\text{ост.}}\text{Co}_1\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{0.9}$	-0.11	-0.60
$(\text{Nd.Pr})_{31.9}\text{Fe}_{\text{ост.}}(\text{CoCuGa})_{1.5}\text{B}_{0.8}$	-0.11	-0.54

**Требования к
генераторам ВЭУ**

$$\alpha \leq |-0.11| \text{ \%/}^\circ\text{C}$$

$$\beta \leq |-0.65| \text{ \%/}^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{раб}} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$$

Заключение

1. По низкокислородной технологии изготовлены магниты двух составов $(\text{Nd,Dy})_{31.2}\text{Fe}_{\text{ост.}}\text{Co}_{1.0}\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{0.9}$ и $(\text{Nd,Pr})_{31.9}\text{Fe}_{\text{ост.}}(\text{Co,Cu,Ga})_{1.5}\text{B}_{0.8}$.
2. Исследованы основные магнитные характеристики спеченных магнитов при комнатной и повышенной до 120 °С температурах, рассчитаны температурные коэффициенты остаточной индукции и коэрцитивной силы. Температурная стабильность магнитов обоих составов удовлетворяет требованиям, предъявляемым к генераторам ВЭУ.
3. Средний температурный коэффициент α для интервала температур 23 °С - 120 °С одинаков у магнитов, изготовленных из сплавов обоих составов (-0.11 %/°С), тогда как коэффициент β для магнитов из сплава $(\text{Nd,Pr})_{31.9}\text{Fe}_{\text{ост.}}(\text{CoCuGa})_{1.5}\text{B}_{0.8}$ оказывается ниже по сравнению с соответствующей величиной магнита из сплава на основе Dy (-0.54 %/°С и - 0.60 соответственно), что определяет превосходство состава композиции на основе Pr.
4. Учитывая стоимость исходных шихтовых материалов на 1 квартал 2023 г., использование состава $(\text{Nd,Pr})_{31.9}\text{Fe}_{\text{ост.}}(\text{Co,Cu,Ga})_{1.5}\text{B}_{0.8}$ позволяет снизить себестоимость магнитов до 10 % по сравнению с магнитами на основе Dy, что может обеспечить существенный экономический эффект при массовом производстве.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!