

УДК 669.017

*А.В. Алексеев<sup>1</sup>, Г.Ю. Растегаева<sup>1</sup>, Т.Н. Пахомкина<sup>1</sup>, М.Г. Размахов<sup>1</sup>*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕРЫ, УГЛЕРОДА, АЗОТА И КИСЛОРОДА В СПЛАВАХ СИСТЕМ Ce–Fe–Co–B И Gd–Fe–Co–B**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-90-97

*Проведен анализ сплавов систем Ce–Fe–Co–B и Gd–Fe–Co–B на содержание газообразующих примесей. Содержания серы и углерода определено методом сжигания в индукционной печи газоанализатора CS-444 фирмы Leco с последующим детектированием в инфракрасной ячейке спектрометра, а для определения кислорода и азота использовали метод восстановительного плавления в токе инертного газа-носителя с последующим детектированием кислорода в инфракрасной ячейке и азота в кондуктометрической ячейке газоанализатора TC-600 фирмы Leco. Для полного извлечения определяемых элементов использованы различные катализаторы (вольфрам с оловом, оксид ванадия, медная стружка) и выбран наиболее подходящий из них.*

**Ключевые слова:** магнитные материалы, определение кислорода, определение азота, определение серы, определение углерода, метод инфракрасно-абсорбционной спектроскопии.

*A. V. Alekseev<sup>1</sup>, G. Yu. Rastegaeva<sup>1</sup>, T. N. Pahomkina<sup>1</sup>, M. G. Razmahov<sup>1</sup>*

## **DETERMINATION SULFUR, CARBON, NITROGEN AND OXYGEN IN ALLOYS OF SYSTEM Co–Fe–Co–B AND Gd–Fe–Co–B**

*In this paper, the alloys of Ce–Fe–Co–B and Gd–Fe–Co–B systems were analyzed for the content of gas-forming impurities. The sulfur and carbon content was determined by combustion in the induction furnace of the Leco CS-444 gas analyzer with subsequent detection in the infrared cell of the spectrometer, and for the determination of oxygen and nitrogen, the method of reducing melting in the inert carrier gas current was used, followed by detection of oxygen in the infrared cell and nitrogen in the conductometric cell of the Leco TC-600 gas analyzer. For the complete extraction of the elements to be determined, various catalysts were used – tungsten with tin, vanadium oxide, copper chips and the most suitable one was chosen.*

**Keywords:** magnetic material, oxygen determination, nitrogen determination, sulfur determination, carbon determination, infrared absorption spectroscopy method.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### **Введение**

Разработка современных навигационных приборов предполагает повышение требований к эксплуатационным характеристикам используемых в конструкции функциональных материалов. В динамически настраиваемых гироскопах используют постоянные магниты типа Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> с низким температурным коэффициентом индукции (ТКИ) марок КСДГ-25 и КСГЭ-26, однако за последнее время в научной литературе исследований по повышению свойств этих материалов не публиковалось [1–4]. Перспективными материалами для навигационной техники считаются магниты системы РЗМ–Fe–Co–B с ТКИ близким к нулю [5–7]:

Магнит	ТКИ, %/°С
Системы РЗМ–Fe–Co–В (в интервале температур $-60\pm+80^{\circ}\text{C}$ )	-0,0005
Марки КСДГ-25 ( $-60\pm+120^{\circ}\text{C}$ )	-0,01
Марки КСЭГД-27 ( $20-80^{\circ}\text{C}$ )	-0,005

Негативное воздействие как на магнитные свойства, так и на их температурную стабильность могут оказать такие примеси, как сера, углерод, кислород и азот [8, 9]. Повышенное содержание этих элементов может свидетельствовать о нарушении технологического процесса изготовления магнитов либо о некачественных шихтовых материалах. Точный контроль содержания примесей в магнитах является актуальной и важной задачей.

Серу в различных сплавах возможно определять методом йодометрического титрования, при котором навеска пробы сжигается, диоксид серы поглощается водой, добавляется избыток йодистого калия и далее раствор титруют тиосульфатом натрия [10].

Потенциометрический метод применим для определения углерода. Навеску пробы также сжигают, хлорид бария поглощает образовавшийся оксид углерода и при этом происходит изменение рН раствора, степень изменения устанавливается титрованием гидратом оксида бария (вступающим в реакцию с оксидом углерода), по расходу которого рассчитывается содержание углерода [11].

Содержание кислорода определяют путем нагрева пробы в токе сухого водорода и при определении массы паров воды (образующихся в результате реакции определяемого кислорода с водородом) с помощью поглощения ее (воды) метанолом, с последующим титрованием реактивом Карла Фишера. Полученное значение массы паров воды пересчитывают на содержание кислорода (так как весь кислород, содержащийся в пробе, вступил в реакцию с водородом с образованием воды) [12].

Азот определяют спектрофотометрическим методом. Проба растворяется в кислотах, далее образующиеся аммонийные соли взаимодействуют с гидроксидом натрия. Выделившийся аммиак конденсируется и его содержание определяют в спектрофотометре с применением реактива Нesslerа [13].

Все вышеописанные методики чрезвычайно трудоемки, длительны и требуют использования большого количества различных реактивов и оборудования. В настоящее время для определения серы и углерода в различных объектах применяется метод сжигания навески пробы в индукционной печи газоанализатора с последующим детектированием в инфракрасной ячейке спектрометра, а для определения азота и кислорода используется восстановительное плавление в вакууме или в потоке инертного газа-носителя (под методами понимаются общие принципы и тип оборудования, которые используются для анализа независимо от вида объекта анализа, а методикой является точное описание последовательности действий для анализа конкретного объекта). Данные методы значительно упрощают процесс проведения анализа и позволяют получать точные результаты в широком диапазоне определяемых концентраций. При проведении анализа данными методами также необходимо выполнить подбор катализаторов, ускоряющих процесс горения пробы и таким образом повышающих аналитический сигнал, т. е. сигнал прибора, значение которого прямо пропорционально содержанию определяемых элементов в пробе [14, 15].

Целью данной работы являлся подбор составов катализатора и массы навески пробы для определения серы, углерода, кислорода и азота в сплавах систем Ce–Fe–Co–В и Gd–Fe–Co–В методом сжигания навески пробы в индукционной печи газоанализатора с последующим детектированием в инфракрасной ячейке спектрометра.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 11.1. «Термостабильные магнитотвердые материалы и математические модели расчета их

температурных характеристик для навигационных приборов нового поколения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

### Материалы и методы

Анализ сплавов систем Ce–Fe–Co–В и Gd–Fe–Co–В на содержание серы и углерода проводили с помощью газоанализатора CS-444 фирмы Leco (США). В инфракрасной ячейке происходило формирование аналитического сигнала (пары оксидов серы и углерода попадали в ячейку, где в инфракрасной области спектра происходило поглощение части излучения и далее рассчитывалась оптическая плотность, являющаяся аналитическим сигналом), прямо пропорционально зависящего от концентрации серы и углерода. Для максимизации данного сигнала, а также стабильности работы прибора произведена его предварительная настройка – выбраны следующие параметры: время задержки сигнала, мощность печи, уровень компаратора, продолжительность продувки прибора перед анализом.

Пробу сплава системы РЗМ–Fe–Co–В сжигали в керамическом тигле, который предварительно подвергали нагреву при температуре  $>1000^{\circ}\text{C}$  в муфельной печи для уменьшения фонового сигнала от остаточного содержания серы и углерода. Перед проведением анализа тигли помещали в эксикатор и вынимали только непосредственно перед помещением в прибор для максимального уменьшения времени нахождения тигля на открытом воздухе.

Необходимо также учитывать содержание серы и углерода в катализаторах и стараться использовать катализатор с минимальными значениями определяемых элементов, проводя предварительный холостой анализ. Для проведения анализа применяли катализаторы, поставляемые фирмой Leco и содержащие определяемые примеси в минимальных количествах. Применение холостой пробы (пробы, содержащей катализатор без образца, значения содержания примесей в которой далее вычитаются из значений для анализируемых образцов) также исключает вклад катализатора в конечный результат анализа.

В ходе выполнения работы установлена возможность использования следующих катализаторов: оксида ванадия ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ), медной стружки (Cu), вольфрама с оловом (LECOCELPHR 502-173), никеля (NiBASKETS 502-344) – в скобках приведены торговые названия катализаторов, поставляемые фирмой Leco [14].

Анализ сплавов систем Ce–Fe–Co–В и Gd–Fe–Co–В на содержание кислорода и азота проводили с помощью газоанализатора TC-600 фирмы Leco (США). Нагрев образца происходил в индукционной печи, в результате чего кислород, содержащийся в материале пробы, вступал в реакцию с углеродом графитового тигля с образованием оксида углерода, который далее, при попадании в инфракрасную ячейку, определяли по вышеописанному принципу. Для достижения максимума аналитического сигнала и стабилизации его значения выбраны следующие параметры: время задержки сигнала, мощность печи, цикл дегазирования, уровень компаратора, ток дегазирования, задержка интегрирования, продолжительность продувки прибора перед анализом.

Как и в случае с анализом на содержание серы и углерода, для успешного определения азота и кислорода необходимо выполнить подбор катализатора, обеспечивающего полноту сгорания и выделения искомым элементов. Никель (NiBASKETS 502-344) и вольфрам с оловом (LECOCELPHR 502-173) являются наиболее часто используемыми веществами, упрощающими проведение анализа при определении азота и кислорода [15].

Для анализа выбрали по два экспериментальных образца (маркировки проб 1 и 2) из сплавов систем Ce–Fe–Co–В и Gd–Fe–Co–В.

## Результаты и обсуждение

**Определение серы и углерода в сплаве системы Ce-Fe-Co-B**

Результаты определения серы и углерода в двух образцах сплава системы Ce-Fe-Co-B представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты определения серы и углерода в сплаве системы Ce-Fe-Co-B  
с использованием различных типов катализаторов**

Катализатор	Масса навески, г		Содержание, % (по массе)			
			серы		углерода	
	в экспериментальных пробах					
	1	2	1	2	1	2
Без катализатора	0,121	0,117	Нет сигнала*	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,205	0,209	То же	То же	То же	То же
	0,307	0,321	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,412	0,408	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,517	0,508	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,620	0,611	-«-	-«-	-«-	-«-
Cu	0,121	0,115	0,0017	0,0015	-«-	-«-
	0,213	0,213	0,0017	0,0020	-«-	-«-
	0,305	0,304	0,0019	0,0023	-«-	-«-
	0,417	0,411	0,0024	0,0023	-«-	-«-
	0,517	0,513	0,0022	0,0025	-«-	-«-
	0,610	0,600	0,0023	0,0024	-«-	-«-
Среднее значение			0,0020	0,0022	-	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,102	0,108	0,0006	0,0004	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,206	0,217	0,0007	0,0003	То же	То же
	0,301	0,313	0,0018	0,0012	-«-	-«-
	0,413	0,408	0,0011	0,0012	-«-	-«-
	0,512	0,515	0,0014	0,0011	-«-	-«-
	0,618	0,604	0,0011	0,0013	-«-	-«-
Среднее значение			0,0011	0,0009	-	-
LECOCELLHP	0,103	0,118	0,0023	0,0023	0,021	0,020
	0,212	0,206	0,0023	0,0025	0,022	0,019
	0,318	0,311	0,0025	0,0024	0,020	0,021
	0,404	0,407	0,0024	0,0025	0,021	0,020
	0,513	0,505	0,0025	0,0023	0,021	0,023
	0,621	0,620	0,0022	0,0024	0,023	0,021
Среднее значение			0,0024	0,0024	0,021	0,021
NiBASKETS	0,108	0,113	0,0015	0,0015	0,010	0,014
	0,219	0,212	0,0017	0,0018	0,012	0,015
	0,308	0,304	0,0011	0,0013	0,011	0,013
	0,412	0,413	0,0010	0,0011	0,010	0,014
	0,514	0,517	0,0011	0,0010	0,015	0,015
	0,602	0,606	0,0010	0,0010	0,014	0,013
Среднее значение			0,0012	0,0013	0,012	0,014

\* Здесь и далее – «Нет сигнала» обозначает отсутствие аналитического сигнала прибора вследствие неполного сгорания пробы в тигле.

Без использования катализатора сжигание образца происходит не в полном объеме и, как следствие, сера и углерод не выделяются. При использовании меди (Cu) и оксида ванадия (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) в качестве катализатора происходит выделением только серы, причем значения содержаний низки (по сравнению с другими катализаторами), что также свидетельствует о неполном сгорании образца. В присутствии двух других катализаторов выделяются оба определяемых элемента, однако содержания серы и кислорода имеют большие значения при использовании катализатора LECOCELLHP, чем

при использовании катализатора NiBASKETS. При этом разброс полученных значений меньше, что свидетельствует о полном извлечении серы и углерода из проб и, как следствие, точном проведении определения искомым элементов. Значения содержаний серы и углерода для разных масс навески совпадают, что также свидетельствует в пользу применения соединения LECOCELLHP в качестве катализатора. При этом надо учитывать, что данные катализаторы содержат минимальные количества углерода и серы, а также использование холостой пробы (пробы с катализатором, но без образца) полностью исключает вклад содержащихся в них примесей в конечные результаты анализа.

Таким образом, при определении серы и углерода в сплаве системы Ce-Fe-Co-B необходимо использовать катализатор LECOCELLHP.

**Определение углерода и серы в сплаве системы Gd-Fe-Co-B**

Результаты определения серы и углерода в двух образцах сплава системы Gd-Fe-Co-B представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты определения углерода и серы в сплаве системы Gd-Fe-Co-B с использованием различных типов катализаторов**

Катализатор	Масса навески, г		Содержание, % (по массе)			
			серы		углерода	
	в экспериментальных пробах					
	1	2	1	2	1	2
Без катализатора	0,116	0,129	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,214	0,213	То же	То же	То же	То же
	0,312	0,314	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,425	0,417	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,506	0,502	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,613	0,603	-«-	-«-	-«-	-«-
Cu	0,107	0,127	0,0014	0,0017	-«-	-«-
	0,205	0,215	0,0014	0,0020	-«-	-«-
	0,324	0,303	0,0016	0,0020	-«-	-«-
	0,408	0,407	0,0020	0,0021	-«-	-«-
	0,516	0,517	0,0021	0,0025	-«-	-«-
	0,608	0,608	0,0022	0,0023	-«-	-«-
Среднее значение			0,0018	0,0021	-	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,103	0,112	0,0007	0,0006	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,214	0,211	0,0005	0,0008	То же	То же
	0,305	0,323	0,0010	0,0010	-«-	-«-
	0,405	0,417	0,0011	0,0011	-«-	-«-
	0,527	0,514	0,0013	0,0011	-«-	-«-
	0,613	0,604	0,0012	0,0012	-«-	-«-
Среднее значение			0,0010	0,0009	-	-
LECOCELLHP	0,109	0,113	0,0035	0,0034	0,024	0,022
	0,207	0,208	0,0035	0,0033	0,021	0,022
	0,315	0,304	0,0033	0,0033	0,021	0,024
	0,414	0,417	0,0034	0,0035	0,022	0,022
	0,537	0,528	0,0035	0,0035	0,023	0,023
	0,608	0,611	0,0035	0,0034	0,022	0,023
Среднее значение			0,0035	0,0034	0,022	0,023
NiBASKETS	0,116	0,107	0,0015	0,0015	0,018	0,019
	0,213	0,214	0,0011	0,0018	0,012	0,015
	0,307	0,327	0,0013	0,0019	0,015	0,018
	0,409	0,412	0,0014	0,0010	0,018	0,019
	0,506	0,514	0,0011	0,0011	0,012	0,014
	0,618	0,607	0,0015	0,0015	0,014	0,014
Среднее значение			0,0013	0,0015	0,015	0,017

При определении серы и углерода в сплаве системы Gd–Fe–Co–B, также как и при анализе сплава системы Ce–Fe–Co–B, наиболее подходящим является использование катализатора LECOCELLHP.

### Определение азота и кислорода в сплаве системы Ce–Fe–Co–B

Результаты определения азота и кислорода в двух образцах сплава системы Ce–Fe–Co–B представлены в табл. 3.

Таблица 3

#### Результаты определения азота и кислорода в сплаве системы Ce–Fe–Co–B с использованием различных типов катализаторов

Катализатор	Масса навески, г		Содержание, % (по массе)			
			азота		кислорода	
	в экспериментальных пробах					
	1	2	1	2	1	2
Без катализатора	0,131	0,132	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,202	0,201	То же	То же	То же	То же
	0,342	0,345	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,435	0,424	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,571	0,503	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,627	0,627	-«-	-«-	-«-	-«-
NiBASKETS	0,116	0,102	0,0044	0,0044	0,0084	0,0082
	0,218	0,278	0,0045	0,0043	0,0081	0,0082
	0,327	0,347	0,0043	0,0043	0,0081	0,0084
	0,412	0,415	0,0044	0,0045	0,0082	0,0082
	0,523	0,526	0,0045	0,0045	0,0083	0,0083
	0,614	0,612	0,0045	0,0044	0,0082	0,0083
Среднее значение			0,0044	0,0044	0,0082	0,0083
LECOCELLHP	0,103	0,115	0,0025	0,0035	0,0048	0,0019
	0,218	0,216	0,0031	0,0028	0,0012	0,0025
	0,315	0,327	0,0033	0,0039	0,0035	0,0028
	0,425	0,419	0,0044	0,0040	0,0038	0,0019
	0,514	0,514	0,0021	0,0031	0,0052	0,0034
	0,607	0,601	0,0025	0,0035	0,0044	0,0034
Среднее значение			0,0030	0,0035	0,0038	0,0027

Из данных табл. 3 видно, что без использования катализатора сжигание образца происходит не в полном объеме и, как следствие, азот и кислород не выделяются. В присутствии катализатора LECOCELLHP выделяются оба определяемых элемента, однако значения содержаний азота и кислорода больше при использовании катализатора NiBASKETS. При этом разброс полученных значений меньше, что свидетельствует о полном извлечении азота и кислорода из проб и, как следствие, точном проведении определения искомых элементов. Значения содержаний азота и кислорода для разных масс навески совпадают, что также свидетельствует в пользу применения соединения NiBASKETS в качестве катализатора.

Таким образом, при определении азота и кислорода в сплаве системы Ce–Fe–Co–B необходимо использовать катализатор NiBASKETS.

### Определение азота и кислорода в сплаве системы Gd–Fe–Co–B

Результаты определения азота и кислорода в двух образцах сплава системы Gd–Fe–Co–B представлены в табл. 4.

**Результаты определения азота и кислорода в сплаве системы Gd–Fe–Co–B с использованием различных типов катализаторов**

Катализатор	Масса навески, г		Содержание, % (по массе)			
			азота		кислорода	
	в экспериментальных пробах					
	1	2	1	2	1	2
Без катализатора	0,101	0,112	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,222	0,211	То же	То же	То же	То же
	0,312	0,335	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,425	0,434	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,521	0,513	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,607	0,617	-«-	-«-	-«-	-«-
NiBASKETS	0,112	0,112	0,0044	0,0044	0,0084	0,0082
	0,218	0,208	0,0045	0,0043	0,0081	0,0082
	0,324	0,307	0,0043	0,0043	0,0081	0,0084
	0,415	0,405	0,0044	0,0045	0,0082	0,0082
	0,522	0,516	0,0045	0,0045	0,0083	0,0083
	0,617	0,602	0,0045	0,0044	0,0082	0,0083
Среднее значение			0,0044	0,0044	0,0082	0,0083
LECOCELLHP	0,103	0,115	0,0025	0,0035	0,0048	0,0019
	0,218	0,216	0,0031	0,0028	0,0012	0,0025
	0,315	0,327	0,0033	0,0039	0,0035	0,0028
	0,425	0,419	0,0044	0,0040	0,0038	0,0019
	0,514	0,514	0,0021	0,0031	0,0052	0,0034
	0,607	0,601	0,0025	0,0035	0,0044	0,0034
Среднее значение			0,0030	0,0035	0,0038	0,0027

При определении азота и кислорода в сплаве системы Gd–Fe–Co–B, также как и при анализе сплава системы Ce–Fe–Co–B, наиболее подходящим является использование катализатора NiBASKETS.

### Заключения

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- выбраны параметры настройки газоанализаторов CS-444 и TC-600 для определения серы, углерода, азота и кислорода в сплавах систем Ce–Fe–Co–B и Gd–Fe–Co–B;
- вольфрам с оловом является наилучшим катализатором марки LECOCELLHP для определения серы и углерода в сплавах систем Ce–Fe–Co–B и Gd–Fe–Co–B;
- никель является наилучшим катализатором марки NiBASKETS для определения азота и кислорода в сплавах систем Ce–Fe–Co–B и Gd–Fe–Co–B.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Пискорский В.П., Крамер В.В. Разработка технологии выплавки сплавов системы РЗМ–Fe–Co–B с высокой чистотой по примесям для термостабильных магнитов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №1 (37). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.06.2019). DOI: 10.18557/2307-6046-2016-0-1-1-1.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Давыдова Е.А. Фазовый состав спеченных материалов системы Pr–Dy–Fe–Co–B // Авиационные материалы и технологии. 2015. №S2 (39). С. 5–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-5-10.

4. Чередниченко И.В., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Бузенков А.В. Экономические аспекты производства постоянных магнитов // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016. №4 (22). Ст. 06. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 06.06.2019).
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Чередниченко И.В., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Пискорский В.П. Влияние содержания меди на фазовый состав и магнитные свойства термостабильных спеченных магнитов систем Nd–Dy–Fe–Co–B и Pr–Dy–Fe–Co–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S2 (39). С. 11–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-11-19.
6. Давыдова Е.А., Чабина Е.Б., Моисеева Н.С. Влияние гадолиния, а также способа его введения на структуру и фазовый состав магнитотвердого спеченного материала системы Pr–Dy–Fe–Co–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 56–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-56-59.
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Резчикова И.И., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Зависимость свойств спеченных материалов системы Nd–Dy–Fe–Co–B от технологических параметров // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S2 (39). С. 24–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-24-29.
8. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Пискорский В.П., Сульянова Е.А. Влияние кобальта на стойкость к окислению материалов Pr(Nd)–Dy–Fe–Co–B // *Металлы*. 2016. №4. С. 52–56.
9. Каблов Е.Н., Чабина Е.Б., Морозов Г.А., Муравская Н.П. Оценка соответствия новых материалов с использованием СО и МИ высокого уровня // *Компетентность*. 2017. №2. С. 40–46.
10. ГОСТ 6689.18–92. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения серы. М.: Изд-во стандартов, 1992. С. 4.
11. ГОСТ 6689.10–92. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения углерода. М.: Изд-во стандартов, 1992. С. 4.
12. ГОСТ 29006–91. Порошки металлические. Метод определения кислорода, восстановимого водородом. М.: Изд-во стандартов, 1991. С. 3.
13. ГОСТ 12359–99. Стали углеродистые, легированные и высоколегированные. Методы определения азота. М.: Изд-во стандартов, 1999. С. 3.
14. Алексеев А.В., Растегаева Г.Ю., Пахомкина Т.Н. Определение серы и углерода в порошках никелевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2018. №11 (71). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.06.2019). DOI: 10.18557/2307-6046-2018-0-11-20-27.
15. Алексеев А.В., Растегаева Г.Ю., Пахомкина Т.Н. Определение кислорода и азота в порошках никелевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2018. №8 (68). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.06.2019). DOI: 10.18557/2307-6046-2018-0-8-112-119.