

УДК 669.017.165

*А.В. Алексеев¹, Г.Ю. Растегаева¹, Т.Н. Пахомкина¹***ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕРЫ, УГЛЕРОДА, АЗОТА И КИСЛОРОДА
В СПЛАВАХ СИСТЕМ Pr–Dy–Fe–Co–B и Nd–Dy–Fe–Co–B**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-95-102

Проведено определение серы, углерода, кислорода и азота в сплавах систем Pr–Dy–Fe–Co–B и Nd–Dy–Fe–Co–B. Серу и углерод определяли методом сжигания пробы в индукционной печи с последующим детектированием в инфракрасной ячейке газоанализатора CS-444 фирмы Leco, 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. Осуществлен подбор катализатора, способствующего полному сгоранию материала пробы и максимальному выходу определяемых элементов.

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

*A.V. Alekseev¹, G.Yu. Rastegaeva¹, T.N. Pakhomkina¹***DETERMINATION SULFUR, CARBON, NITROGEN AND OXYGEN
IN ALLOYS OF SYSTEM Pr–Dy–Fe–Co–B AND Nd–Dy–Fe–Co–B**

In this paper, the alloys of Pr–Dy–Fe–Co–B and Nd–Dy–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, sulfur determination, carbon determination, nitrogen determination, oxygen determination, infrared absorption spectroscopy method.

¹Федеральное 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

Повышение требований к эксплуатационным характеристикам используемых в конструкции функциональных материалов является важной задачей при разработке современных навигационных приборов. Постоянные магниты типа Sm₂Co₁₇ применяются в динамически настраиваемых гироскопах, однако за последнее время в научно-технической литературе исследований по повышению свойств этих материалов не публиковалось. Сплавы системы РЗМ–Fe–Co–B являются перспективными материалами для навигационной техники – температурный коэффициент индукции (ТКИ) магнитов этой системы сплавов составляет [1–4]:

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	-0,005

Примеси серы, углерода, кислорода и азота оказывают негативное воздействие как на магнитные свойства, так и на их температурную стабильность. 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 [5–7].

При разработке и производстве сплавов систем РЗМ–Fe–Co–В необходимо производить точный контроль содержания азота, кислорода, углерода и серы, так как даже незначительные количества данных примесей могут привести к ухудшению магнитных свойств данных материалов и выпуску некачественной продукции. Применение некачественных шихтовых материалов, а также нарушение технологии производства может служить причиной повышенного содержания вредных примесей в магнитных материалах [8, 9].

Содержание углерода в металлах и сплавах возможно определять волюмометрическим методом. Пробу сжигают в токе кислорода с образованием оксида углерода, который далее поглощается раствором гидроксида калия. При этом при помощи газоизмерительной бюретки (эвдиометра) устанавливается объем оксида углерода до поглощения едким калием и после химической реакции с ним. По разности данных объемов, а также с учетом количества щелочи и рассчитывается содержание углерода в пробе [10].

Йодометрическое титрование в прошлом служило основным методом определения серы в различных материалах. Навеску пробы сжигают в токе кислорода, при этом вся сера, содержащаяся в анализируемом материале, окисляется до диоксида серы. Далее диоксид серы поглощается водой с образованием сернистой кислоты. К сернистой кислоте приливают избыток йодистого калия, а после реакции остаток йода титруют тиосульфатом натрия [11].

Титриметрическим методом можно также установить содержание азота. Анализируемый образец растворяют в серной или соляной кислотах, при этом весь азот, содержащийся в пробе, переходит в форму аммонийных солей, которые далее разлагают избытком едкого натрия с образованием аммиака. Аммиак поглощается водяным паром и полученный раствор титруется реактивом Несслера [12].

Содержание кислорода в различных материалах возможно определять методом восстановления водородом. Анализ проводят при нагревании пробы в токе водорода, при этом весь кислород, содержащийся в образце, восстанавливается до воды. Далее пары воды поглощаются метанолом, а их количество устанавливается путем титрования реактивом Карла Фишера [13].

Методы определения газообразующих примесей с использованием «мокрой химии» (описаны ранее) обладают достаточной точностью, однако анализ с их использованием занимает много времени, чрезвычайно трудоемкий, требует большого количества различных реактивов. Инструментальные методы анализа с использованием различного оборудования лишены этих недостатков. В приборах определения серы и углерода навеска анализируемого образца полностью сгорает в индукционной печи и выделившиеся газы детектируются в инфракрасной ячейке спектрометра, а при определении азота и кислорода сжигание происходит в вакууме или в потоке инертного газа-носителя в присутствии восстановителя. Использование специального оборудования для проведения анализа позволило сократить продолжительность одного эксперимента, а также снизить пределы обнаружения и повысить точность конечного результата определения. Основной проблемой при

использовании данных методов анализа остается правильный выбор катализатора – вещества, способствующего полному сгоранию пробы [14, 15].

Целью данной работы являлась оценка возможности определения серы, кислорода, азота и углерода в сплавах систем Pr–Dy–Fe–Co–B и Nd–Dy–Fe–Co–B с использованием современных газоанализаторов.

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») [2].

Материалы и методы

Аппаратура

Газоанализатор CS-444 использовали для определения серы и углерода в сплавах систем Pr–Dy–Fe–Co–B и Nd–Dy–Fe–Co–B. При сжигании образцов в токе кислорода сера и углерод, содержащиеся в них, полностью окислялись до оксидов и уже в виде газов попадали в измерительную ячейку. В данной ячейке в инфракрасной области спектра происходило частичное поглощение излучения, из чего рассчитывали оптическую плотность, которая являлась аналитическим сигналом. На работу газоанализатора влияние оказывали следующие параметры: уровень компаратора, время задержки сигнала, время продувки прибора перед анализом, мощность печи. Значение данных параметров подбирались с тем расчетом, чтобы аналитический сигнал был максимален и стабилен продолжительное время (не менее 2 ч).

Газоанализатор ТС-600 использовали для определения азота и кислорода в сплавах систем Pr–Dy–Fe–Co–B и Nd–Dy–Fe–Co–B. При нагреве образца в токе инертного газа (гелия) происходило взаимодействие кислорода с углеродом графитового тигля, далее уже оксид углерода попадал в инфракрасную ячейку, где и происходило измерение оптической плотности. Азот определяли с помощью кондуктометрического детектирования. Для достижения стабилизации и максимума аналитического сигнала выбраны следующие параметры: мощность печи, время задержки сигнала, уровень компаратора, цикл дегазирования, ток дегазирования, задержка интегрирования, время продувки прибора перед анализом.

Перед выполнением анализа все керамические тигли подвергали нагреву (не менее 1000°C) в муфельной печи, что способствовало уменьшению фонового сигнала.

Катализаторы

Для уменьшения фонового сигнала также выбраны катализаторы с наименьшим содержанием определяемых элементов, что вместе с применением холостой пробы (пробы с катализатором, но без образца) позволяет полностью исключить вклад постоянных компонентов в конечные результаты анализа [15].

Для проведения анализа выбраны следующие стандартные образцы катализаторов (в скобках указаны торговые наименования образцов):

- медная стружка (Cu);
- оксид ванадия (V₂O₅);
- никель (NiBASKETS 502-344);
- вольфрам с оловом (LECOCELINP 502-173).

Анализ проводили, используя по два экспериментальных образца (маркировки проб 1 и 2) сплава систем Pr–Dy–Fe–Co–B и Nd–Dy–Fe–Co–B.

Результаты и обсуждение

Определение серы и углерода в сплаве системы Pr–Dy–Fe–Co–B

В соответствии с вышеприведенной методикой проведен анализ двух образцов сплава системы Pr–Dy–Fe–Co–B по определению серы и углерода, результаты которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения массовой доли серы и углерода в сплаве системы Pr–Dy–Fe–Co–B с использованием различных типов катализаторов

Катализатор	Масса навески, г		Содержание серы		Содержание углерода	
			% (по массе)			
	в экспериментальных пробах					
	1	2	1	2	1	2
Без катализатора	0,131	0,107	Нет сигнала*	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,215	0,205	То же	То же	То же	То же
	0,327	0,323	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,402	0,418	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,527	0,518	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,630	0,621	-«-	-«-	-«-	-«-
Cu	0,131	0,145	0,0014	0,0032	-«-	-«-
	0,215	0,223	0,0018	0,0038	-«-	-«-
	0,315	0,314	0,0021	0,0045	-«-	-«-
	0,427	0,401	0,0029	0,0052	-«-	-«-
	0,537	0,523	0,0030	0,0055	-«-	-«-
	0,620	0,620	0,0030	0,0054	-«-	-«-
Среднее значение			0,0024	0,0046	-«-	-«-
V ₂ O ₅	0,112	0,112	0,0018	0,0043	-«-	-«-
	0,211	0,208	0,0025	0,0049	-«-	-«-
	0,315	0,304	0,0027	0,0052	-«-	-«-
	0,408	0,415	0,0032	0,0057	-«-	-«-
	0,517	0,506	0,0036	0,0060	-«-	-«-
	0,608	0,611	0,0035	0,0062	-«-	-«-
Среднее значение			0,0029	0,0054	–	–
LECOCELLHP	0,112	0,101	0,0035	0,0047	0,035	0,031
	0,207	0,218	0,0042	0,0056	0,038	0,035
	0,304	0,307	0,0045	0,0061	0,041	0,037
	0,413	0,413	0,0046	0,0064	0,041	0,036
	0,508	0,514	0,0051	0,0063	0,045	0,043
	0,604	0,611	0,0052	0,0068	0,043	0,041
Среднее значение			0,0045	0,0060	0,041	0,037
NiBASKETS	0,116	0,102	0,0072	0,0082	0,034	0,038
	0,203	0,208	0,0073	0,0084	0,035	0,039
	0,311	0,315	0,0073	0,0083	0,035	0,038
	0,407	0,408	0,0074	0,0083	0,033	0,038
	0,503	0,504	0,0072	0,0084	0,035	0,040
	0,612	0,612	0,0073	0,0083	0,034	0,038
Среднее значение			0,0073	0,0083	0,034	0,039

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

Анализируемые образцы сгорают не полностью, если проводить эксперимент без применения катализатора, при этом сера и углерод не выделяются. Использование меди (Cu) как катализатора также приводит к неполному сгоранию образца и детектором прибора определяется только сера. Аналогичный эффект наблюдается и с оксидом ванадия (V₂O₅). При использовании вольфрама с оловом (LECOCELLHP) фиксируется

детектирование углерода, однако значения полученного содержания сильно зависят от массы навесок, что свидетельствует о неполном извлечении определяемых элементов из образца. Наилучшие результаты достигаются при использовании катализатора NiBASKETS – полученные значения постоянны и не зависят от массы навесок, а также их значения максимальны по сравнению с другими катализаторами.

Таким образом, при определении серы и углерода в сплаве системы Pr–Dy–Fe–Co–B необходимо использовать катализатор NiBASKETS.

Определение углерода и серы в сплаве системы Nd–Dy–Fe–Co–B

Проведен анализ двух образцов сплава системы Nd–Dy–Fe–Co–B по определению серы и углерода, результаты которого представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения массовой доли углерода и серы в сплаве системы Nd–Dy–Fe–Co–B с использованием различных типов катализаторов

Катализатор	Масса навески, г		Содержание серы		Содержание углерода	
			% (по массе)			
	в экспериментальных пробах					
	1	2	1	2	1	2
Без катализатора	0,107	0,113	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,206	0,203	То же	То же	То же	То же
	0,308	0,303	«-»	«-»	«-»	«-»
	0,414	0,408	«-»	«-»	«-»	«-»
	0,511	0,510	«-»	«-»	«-»	«-»
	0,605	0,616	«-»	«-»	«-»	«-»
Cu	0,102	0,108	0,0048	0,0036	«-»	«-»
	0,204	0,201	0,0055	0,0045	«-»	«-»
	0,313	0,318	0,0062	0,0051	«-»	«-»
	0,411	0,410	0,0065	0,0056	«-»	«-»
	0,502	0,509	0,0071	0,0060	«-»	«-»
	0,615	0,613	0,0078	0,0063	«-»	«-»
Среднее значение			0,0063	0,0052	«-»	«-»
V ₂ O ₅	0,107	0,112	0,0059	0,0042	«-»	«-»
	0,217	0,211	0,0062	0,0048	«-»	«-»
	0,308	0,302	0,0068	0,0050	«-»	«-»
	0,404	0,416	0,0071	0,0051	«-»	«-»
	0,502	0,513	0,0070	0,0055	«-»	«-»
	0,614	0,608	0,0072	0,0058	«-»	«-»
Среднее значение			0,0067	0,0051	–	–
LECOCELLHP	0,114	0,107	0,0058	0,0054	0,028	0,031
	0,211	0,212	0,0055	0,0053	0,031	0,032
	0,307	0,318	0,0063	0,0053	0,031	0,034
	0,402	0,401	0,0064	0,0055	0,035	0,032
	0,513	0,509	0,0065	0,0065	0,033	0,042
	0,617	0,600	0,0065	0,0064	0,040	0,043
Среднее значение			0,0062	0,0057	0,033	0,036
NiBASKETS	0,102	0,113	0,0069	0,0075	0,048	0,049
	0,208	0,206	0,0071	0,0075	0,051	0,047
	0,318	0,303	0,0072	0,0074	0,050	0,048
	0,413	0,408	0,0070	0,0076	0,051	0,049
	0,514	0,505	0,0071	0,0075	0,050	0,049
	0,609	0,611	0,0070	0,0074	0,049	0,050
Среднее значение			0,0071	0,0075	0,050	0,049

В соответствии с полученными результатами, наиболее подходящим катализатором для определения серы и углерода в сплаве системы Nd–Dy–Fe–Co–B является использование катализатора NiBASKETS.

Определение азота и кислорода в сплаве системы Pr–Dy–Fe–Co–B

Проведен анализ двух образцов сплава системы Pr–Dy–Fe–Co–B по определению азота и кислорода, результаты которого представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения массовой доли азота и кислорода в сплаве системы Pr–Dy–Fe–Co–B с использованием различных типов катализаторов

Катализатор	Масса навески, г		Содержание серы		Содержание углерода	
			% (по массе)			
	в экспериментальных пробах					
	1	2	1	2	1	2
Без катализатора	0,106	0,105	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,212	0,217	То же	То же	То же	То же
	0,321	0,306	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,413	0,404	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,501	0,523	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,613	0,609	-«-	-«-	-«-	-«-
NiBASKETS	0,103	0,115	0,0021	0,0056	0,010	0,0099
	0,205	0,243	0,0025	0,0053	0,011	0,010
	0,303	0,321	0,0033	0,0053	0,012	0,010
	0,423	0,408	0,0034	0,0060	0,010	0,0098
	0,507	0,501	0,0051	0,0059	0,015	0,013
	0,623	0,607	0,0047	0,0061	0,021	0,014
Среднее значение			0,0035	0,0057	0,013	0,011
LECOCELPHP	0,111	0,104	0,0055	0,0067	0,016	0,021
	0,203	0,208	0,0057	0,0068	0,015	0,022
	0,301	0,314	0,0056	0,0067	0,017	0,022
	0,412	0,403	0,0056	0,0068	0,016	0,020
	0,501	0,508	0,0057	0,0068	0,016	0,021
	0,613	0,616	0,0055	0,0067	0,015	0,021
Среднее значение			0,0056	0,0068	0,016	0,021

Так же как и при определении серы и углерода, без применения катализатора пробы сгорают не полностью, а наибольшие значения содержания достигаются при использовании катализатора LECOCELPHP, при этом параллельные результаты для навесок различной массы совпадают. Соединение LECOCELPHP является наиболее подходящим катализатором при определении азота и кислорода в сплаве системы Pr–Dy–Fe–Co–B.

Определение азота и кислорода в сплаве системы Nd–Dy–Fe–Co–B

Проведен анализ двух образцов сплава системы Nd–Dy–Fe–Co–B по определению азота и кислорода, результаты которого представлены в табл. 4.

В соответствии с полученными результатами, наиболее подходящим катализатором для определения азота и кислорода в сплаве системы Nd–Dy–Fe–Co–B является использование LECOCELPHP.

Пределы обнаружения элементов составили (в скобках даны значения для прибора):

Элемент	Предел обнаружения, % (по массе)
Сера	0,0009 (0,00006)
Углерод	0,0015 (0,00006)
Азот	0,0012 (0,00005)
Кислород	0,0018 (0,00005)

Таблица 4

Результаты определения массовой доли азота и кислорода в сплаве системы Nd–Dy–Fe–Co–B с использованием различных типов катализаторов

Катализатор	Масса навески, г		Содержание серы		Содержание углерода	
			% (по массе)			
	в экспериментальных пробах					
	1	2	1	2	1	2
Без катализатора	0,117	0,107	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,213	0,208	То же	То же	То же	То же
	0,306	0,317	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,412	0,409	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,502	0,507	-«-	-«-	-«-	-«-
	0,613	0,604	-«-	-«-	-«-	-«-
NiBASKETS	0,102	0,106	0,0052	0,0063	0,011	0,0098
	0,205	0,207	0,0055	0,0070	0,010	0,011
	0,316	0,311	0,0063	0,0065	0,015	0,012
	0,418	0,413	0,0064	0,0066	0,013	0,0089
	0,508	0,506	0,0065	0,0071	0,014	0,010
	0,603	0,618	0,0072	0,0074	0,012	0,0084
Среднее значение			0,0062	0,0068	0,013	0,010
LECOCELLHP	0,117	0,108	0,0085	0,0091	0,017	0,019
	0,206	0,207	0,0083	0,0090	0,016	0,020
	0,301	0,319	0,0084	0,0090	0,017	0,020
	0,403	0,402	0,0085	0,0089	0,017	0,020
	0,508	0,500	0,0083	0,0091	0,015	0,021
	0,618	0,607	0,0085	0,0090	0,017	0,019
Среднее значение			0,0084	0,0090	0,017	0,020

Заключения

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработаны подходы к определению серы, углерода, азота и кислорода в сплавах систем Pr–Dy–Fe–Co–B и Nd–Dy–Fe–Co–B.

2. Для определения серы и углерода в сплавах систем Pr–Dy–Fe–Co–B и Nd–Dy–Fe–Co–B наилучшим катализатором является никель (NiBASKETS).

3. Для определения азота и кислорода в сплавах систем Pr–Dy–Fe–Co–B и Nd–Dy–Fe–Co–B наилучшим катализатором является вольфрам с оловом (LECOCELLHP).

ЛИТЕРАТУРА

- Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Давыдова Е.А., Бузенков А.В. и др. Влияние отжига сплава Pr–Dy–Fe–Co–B на его фазовый состав и свойства спеченных магнитов, изготовленных из него // *Металлы*. 2018. №2. С. 28–32.
- 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.

3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Резчикова И.И., Валеев Р.А. и др. Низкотемпературная аномалия намагниченности в сплавах $(Pr, Dy, M)_2(Fe, Co)_{14}B$ ($M=Gd, Sm, Nd$) // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. №3. С. 502–505.
4. 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.
5. Чередниченко И.В., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Бузенков А.В. Экономические аспекты производства постоянных магнитов (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №4 (22). Ст. 06. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 06.06.2019).
6. 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.
7. 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.
8. Чередниченко И.В., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Бузенков А.В. Материалы для постоянных магнитов (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №4 (22). Ст. 05. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 08.06.2019).
9. 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.
10. ГОСТ 6689.10–92. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения углерода. М.: Изд-во стандартов, 1992. С. 4.
11. ГОСТ 6689.18–92. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения серы. М.: Изд-во стандартов, 1992. С. 4.
12. ГОСТ 12359–99. Стали углеродистые, легированные и высоколегированные. Методы определения азота. М.: Изд-во стандартов, 1999. С. 3.
13. ГОСТ 29006–91. Порошки металлические. Метод определения кислорода, восстановимого водородом. М.: Изд-во стандартов, 1991. С. 3.
14. Алексеев А.В., Растегаева Г.Ю., Пахомкина Т.Н., Размахов М.Г. Определение серы, углерода, азота и кислорода в сплавах систем $Se-Fe-Co-B$ и $Gd-Fe-Co-B$ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. №8 (80). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.06.2019). DOI: 10.18557/2307-6046-2019-0-8-90-97.
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.