

УДК 669.018.44:669.35

А.В. Алексеев¹, Т.Н. Пахомкина¹, Ю.В. Лапшина¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕРЫ, УГЛЕРОДА, АЗОТА И КИСЛОРОДА В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ МЕДИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-112-119

Проведено определение газообразующих примесей в образцах из низколегированных медных сплавов систем Cu–Cr и Cu–Cr–Zr. Содержания серы и углерода определены методом сжигания в индукционной печи газоанализатора с последующим детектированием в инфракрасной ячейке спектрометра. Для определения кислорода и азота использовали метод восстановительного плавления в токе инертного газа-носителя с последующим детектированием кислорода в инфракрасной ячейке, а азота в кондуктометрической ячейке газоанализатора.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы, медные сплавы, определение серы, определение углерода, определение азота, определение кислорода, метод инфракрасно-абсорбционной спектроскопии.

A. V. Alekseev¹, T. N. Pahomkina¹, Yu. V. Lapshina¹

DETERMINATION OF SULFUR, CARBON, NITROGEN AND OXYGEN IN COPPER BASED ALLOYS

The determination of gas-forming impurities in samples of low-alloyed copper alloys of the Cu–Cr and Cu–Cr–Zr systems is carried out. The content of sulfur and carbon was determined by the method of combustion in an induction furnace of a gas analyzer with subsequent detection in the infrared cell of the spectrometer, and to determine oxygen and nitrogen, the method of reducing melting in a flow of an inert carrier gas was used, followed by the detection of oxygen in the infrared cell and nitrogen in the conductometric cell of the gas analyzer.

Keywords: superalloys, copper alloys, sulfur determination, carbon determination, nitrogen determination, oxygen determination, infrared absorption spectroscopy method.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Современная авиационная промышленность требует применения совершенно новых материалов, обладающих уникальными свойствами. Значительную часть таких материалов составляют жаропрочные (в основном на основе никеля) сплавы, позволяющие узлам и деталям газотурбинных двигателей работать и сохранять свои характеристики при экстремально высоких температурах (близких к 1000 °С) [1–4].

В настоящее время также активно применяют жаропрочные бронзы – низколегированные медные сплавы различного состава. Такие сплавы обладают высокими коррозионной стойкостью, прочностью, упругостью и пластичностью, а также тепло- и электропроводностью, технологичностью при литье, пластической деформации, сварке, пайке и механической обработке. Максимальной жаропрочностью (до 500–550 °С) для медных материалов характеризуются низколегированные бронзы на основе систем

Cu–Cr, Cu–Zr и Cu–Cr–Zr, при этом они сохраняют повышенные показатели тепло- и электропроводности, характерные для меди, благодаря чему данные материалы часто используют для контактной сварки и для машин сварки сопротивлением (такие типы сварки активно используют в авиационной промышленности). Из данных сплавов изготавливают катализаторы, теплообменники, коллекторные пластины, токопроводящие пружины и контакты [5–7].

Следует отметить, что в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в разное время проводили исследования по разработке различных бериллийсодержащих медных сплавов. Например, разработаны сплав марки ВБр-1 системы Cu–Co–Ni–Be–Ti, характеризующийся высокими прочностью, тепло- и электропроводностью, а также припой на основе системы Cu–Be, позволяющий заменить серебряные припои, применяемые для изготовления различных контрольно-измерительных приборов [8].

Основные характеристики медных сплавов напрямую зависят от их химического состава, а также от содержания газообразующих примесей, таких как азот, кислород, углерод и сера. Таким образом, выпуск качественных материалов не представляется возможным без точного контроля содержаний данных примесей в сплавах [9].

Классическим методом титриметрии возможно определить серу в меди в диапазоне от 0,001 до 0,020 % (по массе). Для этого навеску анализируемого образца полностью сжигают в токе кислорода при температуре 1200 °С. Далее образовавшийся диоксид серы поглощается водным раствором крахмала, после чего полученную сернистую кислоту титруют раствором йода. Точку эквивалентности устанавливают по изменению окраски раствора с бесцветного на синий [10].

Углерод в различных материалах определяют кулонометрическим методом в диапазоне от 0,002 до 2,000 % (по массе). Навеску образца сжигают в токе кислорода в присутствии катализатора (плавень) при температуре 1300–1400 °С. Диоксид углерода поглощается специальным поглотительным раствором (чаще всего используют водный раствор щелочи) с известным первоначальным значением рН. Затем с помощью установки кулонометрического титрования измеряют количество электричества, затраченного для восстановления исходного значения рН, которое пропорционально содержанию углерода в навеске пробы [11].

Для определения кислорода в меди (в диапазоне от 0,01 до 0,15 % (по массе)) используют металлографический метод, основанный на сравнении под микроскопом шлифов, изготовленных из образцов из литой или деформированной меди, с эталонными микрофотографиями [12].

Содержание азота определяют спектрофотометрическим методом. Пробу растворяют в кислотах, далее образующиеся аммонийные соли взаимодействуют с гидроксидом натрия. Выделившийся аммиак конденсируется, и его содержание определяют в спектрофотометре с применением реактива Несслера [13].

Однако данные методики чрезвычайно трудоемки, длительны и требуют использования большого количества различных реактивов и оборудования. В настоящее время для определения серы и углерода в различных объектах применяют метод сжигания навески пробы в индукционной печи газоанализатора с последующим детектированием в инфракрасной ячейке спектрометра, а для определения азота и кислорода используют восстановительное плавление в вакууме или в потоке инертного газа-носителя (под методами принято понимать общие принципы и тип оборудования, которое используется для анализа независимо от вида пробы, а методикой является точное описание последовательности действий для анализа конкретного объекта). Данные методы значительно упрощают процесс анализа и позволяют получать точные результаты в широких диапазонах определяемых концентраций. Кроме того, при проведении анализа данными

методами необходимо выполнить подбор катализаторов, ускоряющих процесс горения пробы, и, таким образом, повысить аналитический сигнал (сигнал прибора, значение которого прямо пропорционально содержанию определяемых элементов в пробе) [14, 15].

Цель данной работы – подбор составов катализатора и массы навески пробы для определения серы, углерода, кислорода и азота в медных сплавах систем Cu–Cr и Cu–Cr–Zr методом сжигания навески пробы в индукционной печи газоанализатора с последующим детектированием в инфракрасной ячейке спектрометра.

Материалы и методы

Анализ медных сплавов систем Cu–Cr и Cu–Cr–Zr на содержание серы и углерода проводили с помощью газоанализатора. В инфракрасной ячейке формировался аналитический сигнал (пары оксидов серы и углерода попадали в ячейку, где в инфракрасной области спектра происходило поглощение части излучения; далее рассчитывали оптическую плотность, являющуюся аналитическим сигналом), который прямо пропорционально зависит от концентраций серы и углерода. Для максимизации данного сигнала, а также для стабильности работы прибора выполняли предварительную настройку прибора: выбраны такие параметры, как время задержки сигнала, мощность печи, уровень компаратора и время продувки прибора перед анализом.

Пробу сплава сжигали в керамическом тигле, который предварительно нагревали при температуре >1000 °С в муфельной печи для уменьшения фонового сигнала от остаточных содержаний 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.

Следует также учитывать содержания серы и углерода в катализаторах и стараться использовать катализатор с минимальными концентрациями определяемых элементов, предварительно осуществив «холостой» анализ (пробы с катализатором, но без образца). Для проведения анализа использовали катализаторы (плавни), которые не содержали определяемых примесей.

При выполнении работы установлена возможность использования следующих катализаторов: оксид ванадия (V_2O_5), медная стружка (Cu), вольфрам с оловом (LECOCELPHR 502-173) и никель (NiBASKETS 502-344) [14].

Анализ медных сплавов систем Cu–Cr и Cu–Cr–Zr на содержание кислорода и азота проводили с помощью газоанализатора TC-600. Нагрев образца происходил в индукционной печи, в результате чего кислород, присутствующий в материале проб, вступал в реакцию с углеродом графитового тигля с образованием оксида углерода, содержание которого при попадании в инфракрасную ячейку определяли по описанному ранее принципу. Для достижения максимума аналитического сигнала и стабилизации его значения выбраны такие параметры, как время задержки сигнала, мощность печи, цикл дегазирования, уровень компаратора, ток дегазирования, задержка интегрирования и время продувки прибора перед анализом.

Для успешного определения азота и кислорода, как и в случае с анализом на содержание серы и углерода, необходимо выполнить подбор катализатора, обеспечивающего полноту сгорания и выделения искоемых элементов [15].

Для анализа выбраны по два экспериментальных образца (с маркировкой проб 1 и 2) из медных сплавов систем Cu–Cr и Cu–Cr–Zr.

Результаты и обсуждение

Определение серы и углерода в медном сплаве системы Cu–Cr

Результаты определения серы и углерода в двух образцах из медного сплава системы Cu–Cr представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения содержаний серы и углерода в медном сплаве системы Cu–Cr с использованием различных типов катализаторов

Катализатор	Навеска, г		Содержание элементов, % (по массе)			
			серы		углерода	
	с маркировкой пробы					
	1	2	1	2	1	2
Без катализатора	0,108	0,111	Нет сигнала*	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,232	0,241				
	0,304	0,308				
	0,410	0,417				
	0,503	0,504				
	0,600	0,621				
Cu	0,108	0,103	0,0032	0,0030	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,208	0,212	0,0030	0,0035		
	0,305	0,304	0,0029	0,0033		
	0,417	0,411	0,0034	0,0033		
	0,517	0,513	0,0032	0,0035		
	0,610	0,600	0,0033	0,0034		
	Среднее значение		0,0032	0,0033		
V ₂ O ₅	0,113	0,111	0,0026	0,0024	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,202	0,213	0,0027	0,0023		
	0,305	0,315	0,0028	0,0022		
	0,414	0,406	0,0021	0,0022		
	0,511	0,510	0,0024	0,0021		
	0,611	0,608	0,0021	0,0023		
	Среднее значение		0,0021	0,0023		
LECOCELIHP 502-173	0,106	0,114	0,0043	0,0043	0,028	0,026
	0,213	0,204	0,0043	0,0045	0,027	0,027
	0,317	0,312	0,0045	0,0044	0,028	0,027
	0,403	0,404	0,0044	0,0045	0,028	0,028
	0,512	0,501	0,0045	0,0043	0,027	0,028
	0,622	0,621	0,0042	0,0044	0,029	0,026
	Среднее значение		0,0044	0,0044	0,028	0,027
NiBASKETS 502-344	0,106	0,118	0,0038	0,0035	0,013	0,010
	0,213	0,211	0,0037	0,0038	0,010	0,011
	0,302	0,304	0,0039	0,0033	0,010	0,010
	0,414	0,416	0,0038	0,0031	0,015	0,009
	0,513	0,514	0,0038	0,0030	0,017	0,015
	0,605	0,602	0,0036	0,0030	0,013	0,010
	Среднее значение		0,0038	0,0033	0,013	0,011

* Обозначает отсутствие аналитического сигнала прибора вследствие неполного сгорания пробы в тигле.

Из результатов анализа, представленных в табл. 1, следует, что без использования катализатора сжигание образца происходит не в полном объеме и, как следствие, сера и углерод не выделяются. При использовании Cu и оксида V₂O₅ в качестве катализатора происходит выделение только серы, а углерод не выделяется, что также недопустимо. В присутствии двух других катализаторов выделяются оба определяемых элемента, однако содержаний серы и кислорода при использовании катализатора LECOCELIHP 502-173 больше, чем при использовании NiBASKETS 502-344, что свидетельствует о полном извлечении серы и углерода из проб и, как следствие, о точном определении искомых элементов. Значения содержаний серы и углерода для разных масс навески совпадают, что также свидетельствует о предпочтительном использовании в качестве катализатора вольфрама с оловом. При этом следует учитывать, что такие катализаторы содержат минимальные количества углерода и серы и что использование

«холостой» пробы полностью исключает вклад содержащихся в катализаторах примесей в конечные результаты анализа.

Таким образом, установлено, что при определении серы и углерода в медном сплаве системы Cu–Cr необходимо использовать катализатор LECOCELPHR 502-173.

Определение углерода и серы в медном сплаве системы Cu–Cr–Zr

Результаты определения серы и углерода в двух образцах из медного сплава системы Cu–Cr–Zr представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения содержаний серы и углерода в медном сплаве системы Cu–Cr–Zr с использованием различных типов катализаторов

Катализатор	Навеска, г		Содержание элементов, % (по массе)			
			серы		углерода	
	с маркировкой пробы					
	1	2	1	2	1	2
Без катализатора	0,113	0,125	Нет сигнала*	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,213	0,210				
	0,317	0,318				
	0,421	0,410				
	0,507	0,508				
	0,617	0,606				
Cu	0,102	0,123	0,0011	0,0015		
	0,204	0,218	0,0010	0,0020		
	0,320	0,301	0,0010	0,0023		
	0,403	0,402	0,0012	0,0022		
	0,514	0,518	0,0021	0,0020		
	0,600	0,601	0,0012	0,0013		
Среднее значение			0,0013	0,0019		
V ₂ O ₅	0,104	0,110	0,0005	0,0015		
	0,211	0,217	0,0006	0,0011		
	0,304	0,321	0,0014	0,0018		
	0,401	0,414	0,0015	0,0019		
	0,524	0,511	0,0011	0,0021		
	0,611	0,608	0,0010	0,0022		
Среднее значение			0,0010	0,0018		
LECOCELPHR 502-173	0,102	0,110	0,0055	0,0054	0,044	0,042
	0,204	0,207	0,0055	0,0053	0,041	0,042
	0,311	0,303	0,0053	0,0053	0,041	0,044
	0,412	0,414	0,0054	0,0055	0,042	0,042
	0,533	0,521	0,0055	0,0055	0,043	0,043
	0,600	0,613	0,0055	0,0054	0,042	0,043
Среднее значение			0,0055	0,0054	0,042	0,043
NiBASKETS 502-344	0,110	0,103	0,0025	0,0025	0,028	0,029
	0,211	0,217	0,0021	0,0028	0,022	0,025
	0,304	0,321	0,0023	0,0029	0,025	0,028
	0,403	0,415	0,0024	0,0020	0,028	0,029
	0,501	0,518	0,0021	0,0021	0,022	0,024
	0,617	0,602	0,0025	0,0025	0,024	0,024
Среднее значение			0,0023	0,0025	0,025	0,027

* Обозначает отсутствие аналитического сигнала прибора вследствие неполного сгорания пробы в тигле.

При определении серы и углерода в сплаве системы Cu–Cr–Zr, как и для анализа сплава системы Cu–Cr, наиболее подходящим катализатором является LECOCELPHR 502-173.

Определение азота и кислорода в медном сплаве системы Cu–Cr

Результаты определения азота и кислорода в двух образцах из медного сплава системы Cu–Cr представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения содержаний серы и углерода в медном сплаве системы Cu–Cr с использованием различных типов катализаторов

Катализатор	Навеска, г		Содержание элементов, % (по массе)			
			серы		углерода	
	с маркировкой пробы					
	1	2	1	2	1	2
Без катализатора	0,136	0,130	Нет сигнала*	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,206	0,206				
	0,348	0,342				
	0,434	0,421				
	0,570	0,508				
	0,624	0,625				
NiBASKETS 502-344	0,112	0,100	0,0064	0,0064	0,0094	0,0092
	0,214	0,275	0,0065	0,0063	0,0091	0,0092
	0,329	0,348	0,0063	0,0063	0,0091	0,0094
	0,411	0,414	0,0064	0,0065	0,0092	0,0092
	0,522	0,528	0,0065	0,0065	0,0093	0,0093
	0,612	0,613	0,0065	0,0064	0,0092	0,0093
Среднее значение			0,0064	0,0064	0,0092	0,0093
LECOCELLHP 502-173	0,105	0,117	0,0013	0,0025	0,0058	0,0023
	0,211	0,217	0,0021	0,0038	0,0022	0,0020
	0,318	0,320	0,0023	0,0029	0,0025	0,0034
	0,421	0,414	0,0034	0,0020	0,0028	0,0022
	0,516	0,518	0,0031	0,0021	0,0022	0,0017
	0,601	0,600	0,0035	0,0025	0,0054	0,0013
Среднее значение			0,0026	0,0026	0,0035	0,0022

* Обозначает отсутствие аналитического сигнала прибора вследствие неполного сгорания пробы в тигле.

Из данных, представленных в 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 502-173 выделяются оба определяемых элемента, однако содержаний азота и кислорода при использовании катализатора NiBASKETS 502-344 больше, а разброс полученных значений меньше, что свидетельствует о полном извлечении азота и кислорода из проб и, как следствие, о точном определении искомых элементов. Значения содержаний азота и кислорода для разных масс навески совпадают, что также свидетельствует о предпочтительном использовании никеля в качестве катализатора.

Таким образом, установлено что, при определении азота и кислорода в сплаве системы Cu–Cr необходимо использовать катализатор NiBASKETS 502-344.

Определение азота и кислорода в медном сплаве системы Cu–Cr–Zr

Результаты определения азота и кислорода в двух образцах из медного сплава системы Cu–Cr–Zr представлены в табл. 4.

При определении азота и кислорода в сплаве системы Cu–Cr–Zr, как и для анализа сплава системы Cu–Cr, наиболее подходящим катализатором является NiBASKETS 502-344.

Результаты определения содержаний серы и углерода в медном сплаве системы Cu–Cr–Zr с использованием различных типов катализаторов

Катализатор	Навеска, г		Содержание элементов, % (по массе)			
			серы		углерода	
	с маркировкой пробы					
	1	2	1	2	1	2
Без катализатора	0,105	0,111	Нет сигнала*	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,220	0,214				
	0,313	0,332				
	0,420	0,432				
	0,527	0,514				
	0,600	0,611				
NiBASKETS 502-344	0,113	0,111	0,0084	0,0084	0,0094	0,0092
	0,215	0,204	0,0085	0,0083	0,0091	0,0092
	0,325	0,303	0,0083	0,0083	0,0091	0,0094
	0,418	0,402	0,0084	0,0085	0,0092	0,0092
	0,520	0,518	0,0085	0,0085	0,0093	0,0093
	0,619	0,601	0,0085	0,0084	0,0092	0,0093
Среднее значение			0,0084	0,0084	0,0092	0,0093
LECOCELLHP 502-173	0,102	0,112	0,0017	0,0015	0,0028	0,0033
	0,211	0,211	0,0035	0,0038	0,0017	0,0034
	0,318	0,320	0,0030	0,0029	0,0033	0,0058
	0,424	0,414	0,0014	0,0020	0,0024	0,0029
	0,513	0,515	0,0031	0,0041	0,0033	0,0024
	0,602	0,603	0,0035	0,0045	0,0055	0,0057
Среднее значение			0,0027	0,0031	0,0032	0,0039

* Обозначает отсутствие аналитического сигнала прибора вследствие неполного сгорания пробы в тигле.

Пределы обнаружения серы, углерода, азота и кислорода в медных сплавах систем Cu–Cr и Cu–Cr–Zr

В медных сплавах систем Cu–Cr и Cu–Cr–Zr пределы обнаружения для элементов следующие, % (по массе): 0,00020 для серы (0,00003 для прибора); 0,00110 для углерода (0,00003 для прибора); 0,00130 для азота (0,00005 для прибора); 0,00180 кислорода (0,00003 для прибора).

Заключения

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- в ходе исследования выполнен анализ научно-технической литературы по проблеме определения газообразующих примесей (серы, углерода, кислорода и азота) в сплавах на медной основе, в результате которого выбран наиболее подходящий метод анализа – сжигание пробы в индукционной печи газоанализатора с последующим определением элементов в инфракрасной и кондуктометрической ячейках;
- исходя из специфических характеристик (высокая электро- и теплопроводность в сочетании с жаростойкостью) анализируемых медных сплавов систем Cu–Cr и Cu–Cr–Zr подобраны соответствующие параметры настройки газоанализаторов для определения серы, углерода, азота и кислорода;
- проведен сравнительный анализ медных сплавов систем Cu–Cr и Cu–Cr–Zr с использованием различных типов катализаторов, по результатам которого выбраны наиболее эффективные: для определения серы и углерода – катализатор LECOCELLHP 502-173, для определения азота и кислорода – катализатор NiBASKETS 502-344.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г. Металлургические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
2. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
3. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
4. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
5. Тен Э.Б., Бадмажапов И.Б. Основы разработки многофункциональных жаропрочных медных сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2009. № 6. С. 21–24.
6. Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф., Лозиков И.А. Литые хромсодержащие бронзы, получаемые с применением механически легированных лигатур // *Литье и металлургия*. 2012. № 3. С. 131–135.
7. Бусыгин С.Л., Довженко Н.Н., Можаяев А.В., Демченко А.И., Безруких А.А. Электроды из низколегированного наноструктурированными частицами хрома сплава меди для контактной точечной сварки // *Инновации и инвестиции*. 2020. № 5. С. 174–178.
8. Тебякин А.В., Фоканов А.Н., Подуражная В.Ф. Многофункциональные медные сплавы // *Труды ВИАМ*. 2016. № 12 (48). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.06.2021). DOI: 10.18557/2307-6046-2016-0-12-5-5.
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 13938.2–78. Медь. Методы определения серы. М.: Изд-во стандартов, 1978. С. 2–5.
11. ГОСТ 12344–2003. Стали легированные и высоколегированные. Методы определения углерода. М.: Изд-во стандартов, 2003. С. 4–5.
12. ГОСТ 13938.13–93. Медь. Методы определения кислорода. М.: Изд-во стандартов, 1993. С. 7–20.
13. ГОСТ 12359–99. Стали углеродистые, легированные и высоколегированные. Методы определения азота. Минск: Изд-во стандартов, 1999. С. 3.
14. ASTM E1019-11. Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques. ASTM International. United States, 2011. P. 24.
15. Алексеев А.В., Растегаева Г.Ю., Пахомкина Т.Н., Размахов М.Г. Определение серы, углерода, азота и кислорода в сплавах систем Ce–Fe–Co–W и Gd–Fe–Co–W // *Труды ВИАМ*. 2019. № 8 (80). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-90-97.