

УДК 669.245

А.В. Алексеев¹, Г.Ю. Растегаева¹, Т.Н. Пахомкина¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕРЫ И УГЛЕРОДА В ПОРОШКАХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-20-27

Содержание серы и углерода в порошках никелевых сплавов ЭП648, ВПр50 и ВЖ159 определено методом сжигания в индукционной печи газоанализатора CS-444 фирмы Leco с последующим детектированием в инфракрасной ячейке спектрометра. Для полного извлечения определяемых элементов использованы различные катализаторы (вольфрам с оловом, оксид ванадия, медная стружка) и выбран наиболее подходящий из них. Правильность определения серы и углерода подтверждается анализом стандартного образца состава никелевого сплава.

Ключевые слова: порошковая металлургия, никелевые сплавы, определение серы, определение углерода, метод инфракрасно-абсорбционной спектроскопии.

A. V. Alekseev¹, G. Yu. Rastegaeva¹, T. N. Pahomkina¹

DETERMINATION OF SULFUR AND CARBON IN THE POWDER OF NICKEL ALLOYS

The sulfur and carbon content in the powders of nickel alloys EP648, VPr50 and VZH159 was determined by combustion in an induction furnace gas analyzer CS-444 company Leco, followed by detection in the infrared cell of the spectrometer. Various catalysts – tungsten with tin, vanadium oxide, copper chips were used for the complete extraction of the elements to be determined and the most suitable of them was chosen. The correct determination of sulfur and carbon is confirmed by the analysis of a standard sample of the nickel alloy composition.

Keywords: powder metallurgy, nickel alloys, sulfur determination, carbon 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

Жаропрочные никелевые сплавы занимают в настоящее время одну из ведущих позиций при изготовлении и производстве различных узлов и деталей в авиационной и космической промышленности, что обеспечивается особыми характеристиками данных материалов – способность выдерживать огромные силовые и тепловые нагрузки, а также сохранять заданные свойства в течение всего периода эксплуатации [1]. Вместе с тем при изготовлении деталей из данных материалов часть металла удаляется при использовании различных станков для фрезерования, сверления и т. д. Эти потери ведут к нерациональному расходу ценного сплава, высокой стоимости производства, появлению большого количества отходов. Преодолеть эту проблему возможно с помощью применения аддитивных технологий, дающих возможность не удалять лишний материал, а наоборот наращивать. Данная технология позволяет изготавливать узлы и детали любой сложной формы, сокращать сроки налаживания новых производств, уменьшать

затраты на проектирование и запуск производства. При использовании аддитивных технологий также применяется 3D-моделирование и трехмерная печать, что делает их более предпочтительными по сравнению с классическими технологиями обработки металлов [2–5].

Селективное лазерное сплавление или селективное лазерное спекание (СЛС) является одним из примеров аддитивных технологий. Сущность данного метода в следующем – мощный луч лазера воздействует на порошок сплава и приводит к его послойному спеканию, позволяя добиться получения изделия практически любой формы. Весь процесс осуществляется в специальной камере, наполненной инертным газом. При этом лишний неиспользуемый порошок может применяться снова [6–9].

Ведущую роль в успешном проведении селективного лазерного спекания играет качество исходного порошка – в особенности содержание таких элементов, как сера и углерод [10, 11].

К классическому методу определения серы в никелевых сплавах можно отнести йодометрическое титрование [12]. При использовании данного метода навеска пробы сплава сжигается при температуре 1350–1400°C, затем выделившиеся газы диоксида серы поглощаются водой с образованием сернистой кислоты. Далее к сернистой кислоте добавляют избыточное количество йодистого калия и выделившийся йод титруют раствором тиосульфата натрия до светло-желтой окраски раствора, затем прибавляют раствор крахмала и продолжают титрование до исчезновения синей окраски. По количеству затраченного тиосульфата рассчитывают содержание серы в анализируемой пробе.

Углерод в никелевых сплавах возможно определять, используя потенциометрический метод анализа, который основан на сжигании навески пробы в потоке кислорода с последующим поглощением образовавшегося углекислого газа раствором хлористого бария и гидратом оксида бария. В процессе поглощения диоксида углерода исходный раствор меняет свой рН. Далее полученный раствор титруют гидратом оксида бария до первоначального значения рН [13].

Приведенные методики имеют ряд существенных недостатков – длительное и трудоемкое выполнение анализа, возможность определять одновременно только один элемент, использование большого количества разнообразных реактивов. Этих недостатков лишен метод сжигания навески пробы в индукционной печи газоанализатора с последующим детектированием в инфракрасной ячейке спектрометра. Данный метод позволяет одновременно определять как серу, так и углерод, при минимальной трудоемкости и времени проведения анализа [14–16].

Применение специальных катализаторов (акселераторов) ускоряет и поддерживает горение пробы сплава, при этом необходимо осуществлять подбор катализатора, который обеспечивает полное сгорание анализируемого образца. Из научно-технической литературы известны следующие катализаторы для определения серы и углерода: железо, вольфрам с оловом, оксид ванадия, медная стружка [17]. Следует также отметить необходимость подбора массы навески для успешного проведения анализа.

Целью данной работы являлось определение серы и углерода в порошках никелевых сплавов путем подбора составов катализатора и массы навески пробы.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.1. «Монокристаллические жаропрочные суперсплавы, включая естественные композиты» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Для определения серы и углерода в образцах порошков никелевых сплавов использовали газоанализатор. Детектирование искоемых элементов происходило с помощью инфракрасной ячейки. Настройку прибора осуществляли с целью получения максимального аналитического сигнала от углерода и серы.

В ходе выполнения анализа точные навески порошков никелевых сплавов помещали в специальные керамические тигли, в которых происходили нагрев и сжигание пробы. Во избежание появления фоновых сигналов от материала тиглей их необходимо предварительно отжигать в муфельной печи в течение 2 ч при температуре не менее 1000°C. Далее подготовленные таким образом тигли помещали в эксикатор и вынимали непосредственно при проведении анализа с помощью пинцета. Длительное нахождение тиглей на открытом воздухе может привести к их загрязнению и, как следствие, получению неточных результатов анализа.

При выборе катализаторов необходимо учитывать содержание в них серы и углерода, которое должно быть минимальным. Для нивелирования вклада в аналитический сигнал от катализатора также необходимо перед каждой серией экспериментов проводить анализ предварительной пробы.

Проба для определения серы и углерода может быть в различных формах – стружка, порошок, небольшие кусочки и пластинки. Главное при пробоподготовке – максимально избежать загрязнения пробы.

Для определения серы и углерода использовали следующие катализаторы: медную стружку (Cu), оксид ванадия (V_2O_5), никель (NiBASKETS 502-344) и вольфрам с оловом (LECOCELLHP 502-173).

Два экспериментальных образца (1 и 2) порошков никелевых сплавов ЭП648 и ВПр50 выбраны в качестве объектов анализа.

Для расчета содержания серы и углерода по значениям аналитических сигналов использовали метод внешних стандартов – при этом предварительно измеряют образцы с известным содержанием искоемых элементов и далее строят зависимость аналитического сигнала от концентрации, по которой уже можно рассчитать содержание в неизвестных образцах.

Результаты и обсуждение

Для устранения эффекта фонового сигнала перед каждой серией экспериментов проводили измерение холостой пробы – пробы без образца, но с катализатором. Полученный сигнал от холостой пробы вычитали из аналитических сигналов всех последующих образцов.

Определение серы и углерода в порошке никелевого сплава ЭП648

Результаты определения серы и углерода в двух образцах порошка никелевого сплава ЭП648 представлены в табл. 1. Количество измерений на каждый катализатор составило 6, при этом масса навески последовательно увеличивалась с приблизительно 0,1 до 0,6 г.

Из данных табл. 1 видно, что 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_2O_5) в качестве катализатора происходит выделение только серы, причем значения содержания 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 углерода имеют большие значения при использовании катализатора

LECOCELIHP, чем при использовании катализатора NiBASKETS. При этом достигается наименьший разброс полученных значений, что свидетельствует о полном извлечении серы и углерода из проб и, как следствие, точном проведении определения искомых элементов. Значения содержаний серы и углерода для разных масс навески совпадают, что также свидетельствует в пользу использования соединения LECOCELIHP в качестве катализатора.

Таблица 1

Результаты определения серы и углерода в порошках сплава ЭП648 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	0,101	0,112	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,222	0,211	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,312	0,335	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,425	0,434	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,521	0,513	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,607	0,617	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
Cu	0,102	0,116	0,0012	0,0014	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,217	0,208	0,0017	0,0021	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,324	0,307	0,0018	0,0025	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,412	0,404	0,0022	0,0025	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,521	0,515	0,0023	0,0024	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,612	0,604	0,0022	0,0022	Нет сигнала	Нет сигнала
Среднее значение			0,0019	0,0022	–	–
V ₂ O ₅	0,105	0,117	0,0005	0,0005	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,212	0,214	0,0002	0,0002	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,311	0,321	0,0011	0,0011	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,422	0,412	0,0011	0,0011	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,510	0,511	0,0010	0,0010	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,609	0,608	0,0012	0,0012	Нет сигнала	Нет сигнала
Среднее значение			0,0009	0,0009	–	–
LECOCELIHP	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
NiBASKETS	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

Таким образом, при определении серы и углерода в порошке сплава ЭП648 необходимо использовать катализатор LECOCELIHP.

Определение углерода и серы в порошке никелевого сплава ВПр50

Результаты определения серы и углерода в двух образцах порошка никелевого сплава ВПр50 представлены в табл. 2. Количество измерений на каждый катализатор составило 6, при этом масса навески последовательно увеличивалась с приблизительно 0,1 до 0,6 г.

**Результаты определения серы и углерода в порошках сплава ВПр50
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	0,106	0,119	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,224	0,215	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,318	0,334	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,424	0,437	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,526	0,512	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,602	0,613	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
Cu	0,103	0,117	0,0012	0,0014	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,215	0,205	0,0017	0,0021	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,325	0,302	0,0018	0,0025	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,418	0,405	0,0022	0,0025	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,526	0,513	0,0023	0,0024	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,618	0,607	0,0022	0,0022	Нет сигнала	Нет сигнала
Среднее значение			0,0019	0,0022	–	–
V ₂ O ₅	0,104	0,119	0,0005	0,0005	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,215	0,217	0,0002	0,0002	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,315	0,329	0,0011	0,0011	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,425	0,418	0,0011	0,0011	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,517	0,515	0,0010	0,0010	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,603	0,608	0,0012	0,0012	Нет сигнала	Нет сигнала
Среднее значение			0,0009	0,0009	–	–
LECOCELIHP	0,119	0,115	0,0044	0,0044	0,0084	0,0082
	0,217	0,207	0,0045	0,0043	0,0081	0,0082
	0,325	0,303	0,0043	0,0043	0,0081	0,0084
	0,413	0,407	0,0044	0,0045	0,0082	0,0082
	0,527	0,518	0,0045	0,0045	0,0083	0,0083
	0,618	0,601	0,0045	0,0044	0,0082	0,0083
Среднее значение			0,0044	0,0044	0,0082	0,0083
NiBASKETS	0,106	0,117	0,0025	0,0035	0,0048	0,0019
	0,212	0,217	0,0031	0,0028	0,0012	0,0025
	0,317	0,324	0,0033	0,0039	0,0035	0,0028
	0,429	0,411	0,0044	0,0040	0,0038	0,0019
	0,516	0,513	0,0021	0,0031	0,0052	0,0034
	0,608	0,605	0,0025	0,0035	0,0044	0,0034
Среднее значение			0,0030	0,0035	0,0038	0,0027

Из данных табл. 2 видно, что 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 (V₂O₅) в качестве катализатора происходит выделение только серы, причем значения содержания 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 углерода имеют бóльшие значения при использовании катализатора LECOCELIHP, чем при использовании катализатора NiBASKETS. При этом достигается наименьший разброс полученных значений, 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 использования соединения LECOCELIHP в качестве катализатора.

Таким образом, при определении серы и углерода в порошке сплава ВПр50 необходимо использовать катализатор LECOCELPHR.

Определение углерода и серы в порошке никелевого сплава ВЖ159

Результаты определения серы и углерода в двух образцах порошка никелевого сплава ВЖ159 представлены в табл. 3. Количество измерений на каждый катализатор составило 6, при этом масса навески последовательно увеличивалась с приблизительно 0,1 до 0,6 г.

Таблица 3

Результаты определения серы и углерода в порошках сплава ВЖ159 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	0,108	0,115	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,228	0,216	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,316	0,337	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,424	0,438	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,525	0,514	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,603	0,619	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала	Нет сигнала
Cu	0,106	0,110	0,0012	0,0014	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,218	0,203	0,0017	0,0021	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,327	0,308	0,0018	0,0025	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,414	0,400	0,0022	0,0025	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,523	0,513	0,0023	0,0024	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,610	0,600	0,0022	0,0022	Нет сигнала	Нет сигнала
Среднее значение			0,0019	0,0022	–	–
V ₂ O ₅	0,103	0,110	0,0005	0,0005	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,217	0,211	0,0002	0,0002	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,310	0,328	0,0011	0,0011	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,427	0,416	0,0011	0,0011	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,512	0,514	0,0010	0,0010	Нет сигнала	Нет сигнала
	0,603	0,607	0,0012	0,0012	Нет сигнала	Нет сигнала
Среднее значение			0,0009	0,0009	–	–
LECOCELPHR	0,110	0,116	0,0044	0,0044	0,0084	0,0082
	0,213	0,207	0,0045	0,0043	0,0081	0,0082
	0,326	0,300	0,0043	0,0043	0,0081	0,0084
	0,417	0,403	0,0044	0,0045	0,0082	0,0082
	0,529	0,514	0,0045	0,0045	0,0083	0,0083
	0,610	0,606	0,0045	0,0044	0,0082	0,0083
Среднее значение			0,0044	0,0044	0,0082	0,0083
NiBASKETS	0,108	0,113	0,0025	0,0035	0,0048	0,0019
	0,213	0,214	0,0031	0,0028	0,0012	0,0025
	0,314	0,326	0,0033	0,0039	0,0035	0,0028
	0,422	0,414	0,0044	0,0040	0,0038	0,0019
	0,510	0,515	0,0021	0,0031	0,0052	0,0034
	0,600	0,608	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, сера и углерод не выделяются. При использовании меди (Cu) и оксида ванадия (V₂O₅) в качестве катализатора происходит

выделение только серы, причем значения содержания 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 углерода имеют бóльшие значения при использовании катализатора LECOCELLHP, чем при использовании катализатора NiBASKETS. При этом достигается наименьший разброс полученных значений, что свидетельствует о полном извлечении серы и углерода из проб и, как следствие, точном проведении определения искомых элементов. Значения содержаний серы и углерода для разных масс навески совпадают, что также свидетельствует в пользу использования соединения LECOCELLHP в качестве катализатора.

Таким образом, при определении серы и углерода в порошке сплава ВЖ159 необходимо использовать катализатор LECOCELLHP.

Определение серы и углерода в стандартном образце

Для подтверждения правильности описанной методики анализа проведено определение серы и углерода в стандартном образце состава никелевого сплава 212X 4006 фирмы Polycast Ltd (Англия). В табл. 4 представлены результаты данного анализа.

Таблица 4

Результаты определения серы и углерода в стандартных образцах никелевого сплава с использованием внутреннего стандарта ($n=4, P=0,95$)

Наименование образца	Массовая доля элементов, % (по массе)	
	S	C
212X 4006	0,0269±0,0023	0,0247±0,0014
Аттестованные значения	0,0275±0,0016	0,0241±0,0013

Как видно из данных табл. 4, полученные содержания серы и углерода попадают в доверительный интервал аттестованных значений стандартного образца, что подтверждает правильность определения.

Пределы обнаружения серы и углерода в порошках никелевых сплавов составили: 0,0001% (по массе) – для серы и 0,0008% (по массе) – для углерода.

Заключения

На основе проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- выбраны параметры настройки прибора газоанализатора CS-444 для определения серы и углерода в порошках сплавов ЭП648, ВПр50 и ВЖ159;
- вольфрам с оловом является наилучшим катализатором марки LECOCELLHP для определения серы и углерода в порошках никелевых сплавов;
- правильность определения серы и углерода подтверждается анализом стандартного образца состава никелевого сплава.

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. Kablov E.N., Titov V.I., Gundobin N.V., Karpov Y.A., Karfidova K.E., Kudryavtseva G.S. Rhenium and Ruthenium Determination in Nanostructured High_Temperature Alloys for Aerospace Engineering // *Inorganic materials*. 2015. Vol. 51. No. 14. P. 1363–1369.

3. Буякина А.А., Летников М.Н., Ефимочкин И.Ю. Влияние параметров механического легирования на морфологию частиц металлокерамической порошковой композиции ВЖ175+TiCN // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №9. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.10.2018). DOI: 10.18557/2307-6046-2017-0-9-4-4.
4. Евгенов А.Г., Щербаков С.И., Рогалев А.М. Опробование порошков жаропрочных сплавов ЭП718 и ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» для ремонта деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S1 (43). С. 16–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-16-23.
5. Шестакова Е.А., Шайхутдинова Е.Ф., Янбаев Р.М. Технологии селективного спекания для авиастроения // Ползуновский альманах. 2014. №2. С. 21–24.
6. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели: информ. бюл. 2014. №S. С. 43–47.
7. Волосова М.А., Окунькова А.А. Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи стратегии обработки лазерным лучом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. №4 (2). С. 587–591.
8. Мазалов И.С., Евгенов А.Г., Прагер С.М. Перспективы применения жаропрочного структурно-стабильного сплава ВЖ159 для аддитивного производства высокотемпературных деталей ГДТ // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S1 (43). С. 3–7. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-3-7.
9. Цао Г., Ван И. Наноструктуры и наноматериалы: синтез, свойства и применение. М.: Научный мир, 2012. 515 с.
10. Евгенов А.Г., Неруш С.В., Василенко С.А. Получение и опробование мелкодисперсного металлического порошка высокохромистого сплава на никелевой основе применительно к лазерной LMD-наплавке // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №5. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.07.2018). DOI: 10.18557/2307-6046-2014-0-5-4-4.
11. 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.
12. ГОСТ 6689.18–92. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения серы. М.: Госстандарт, 1992. С. 4.
13. ГОСТ 6689.10–92. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые. Методы определения углерода. М.: Госстандарт, 1992. С. 4.
14. ГОСТ 24018.7–91. Сплавы жаропрочные на никелевой основе. Методы определения углерода. М.: Изд-во стандартов, 1991. С. 3.
15. ГОСТ 24018.8–91. Сплавы жаропрочные на никелевой основе. Методы определения серы. М.: Изд-во стандартов, 1991. С. 3.
16. 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, 2011. P. 24.
17. Алексеев А.В., Растегаева Г.Ю., Пахомкина Т.Н. Опыт определения углерода, серы, кислорода и азота в сплавах на основе ниобия на газоанализаторах фирмы Leco // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №1 (61). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.07.2018). DOI: 10.18557/2307-6046-2018-0-1-3-3.