

УДК 543.6

Ф.Н. Карачевцев<sup>1</sup>, Р.М. Дворецков<sup>1</sup>, Т.Н. Загвоздкина<sup>1</sup>, А.В. Славин<sup>1</sup>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-108-116

*Предложена методика определения титана и циркония методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой в алюминиевых сплавах. Выбраны свободные от существенных спектральных наложений других элементов аналитические линии титана и циркония. Проведен подбор способа пробоподготовки, а именно – растворение в концентрированной азотной кислоте. Проведены исследования метрологических характеристик методики: для содержаний титана и циркония от 0,05 до 0,3 % (по массе) показатель точности составляет не более 5 % (отн.), что полностью обеспечивает возможность проведения аналитического контроля содержания титана и циркония в продукции из алюминиевых сплавов.*

**Ключевые слова:** методика измерений, алюминиевые сплавы, атомно-эмиссионная спектроскопия, индуктивно связанная плазма, титан, цирконий.

F.N. Karachevtsev<sup>1</sup>, R.M. Dvoretsov<sup>1</sup>, T.N. Zagvozdkina<sup>1</sup>, A.V. Slavin<sup>1</sup>

## DETERMINATION OF TITANIUM AND ZIRCONIUM IN ALUMINUM ALLOYS BY ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY WITH INDUCTIVELY COUPLED PLASMA

*A method is proposed for the determination of titanium and zirconium by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry in aluminum alloys. Analytical lines of titanium and zirconium free from other elements significant spectral overlaps are selected. The selection of the sample preparation method was carried out, namely – dissolution in concentrated nitric acid. Studies of the metrological characteristics of the technique were carried out: for titanium and zirconium contents from 0.05 to 0.3 % of the mass. the accuracy index is no more than 5 % rel., which fully ensures the possibility of analytical control of the content of titanium and zirconium in products from aluminum alloys.*

**Keywords:** measurement technique, aluminum alloys, atomic emission spectrometry, inductively coupled plasma, titanium, zirconium.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

Алюминиевые сплавы, благодаря их высокой коррозионной стойкости, прочности, а также низкой плотности, широко применяются в качестве конструкционных материалов в авиации. Их используют для изготовления различных элементов самолета: обшивки, шпангоутов, лонжеронов, нервюр, а также топливных и масляных баков [1]. Легирование алюминиевых сплавов различными элементами приводит к улучшению механических характеристик. Даже небольшое количество титана или циркония модифицирует литую структуру алюминиевого сплава, поскольку эти элементы

частично входят в твердый раствор, что повышает твердорастворное упрочнение. Добавка циркония в количестве 0,1–0,2 % (по массе) повышает температуру рекристаллизации алюминиевых сплавов и приводит к сохранению нерекристаллизованной структуры в прессованных или других горячедеформированных изделиях после термообработки и тем самым обуславливает значительное структурное упрочнение. Добавки циркония препятствуют образованию крупнозернистой структуры в деформированных полуфабрикатах. Добавка титана в алюминиевую матрицу сплава способствует измельчению зерна [1].

В работе [2] показано, что титан, являясь инокулятором, создает в сплаве дополнительные центры рекристаллизации, вследствие чего увеличивается количество зародышей и, как следствие, уменьшается размер конечного зерна. Титан как легирующий элемент имеет большое практическое значение, так как оказывает сильное воздействие на структуру алюминиевых сплавов, в то же время его использование в качестве модификатора является относительно экономичным.

Добавка циркония приводит к образованию циркониевых дисперсоидов ( $Al_3Zr$ ) в сплаве, которые способствуют уменьшению скорости миграции границы зерна ввиду того, что представляют собой барьеры для движения дислокаций. Анализ научно-технических литературных данных позволяет сделать вывод о том, что добавки хрома и титана, так же как и добавки циркония и ванадия, позволяют значительно улучшить характеристики трещиностойкости. Причиной этого является образование компактных мелкодисперсных фаз в процессе термообработки. Равномерное распределение упрочняющих фаз наряду с небольшим размером зерна позволяет получить высокую стойкость к распространению усталостных трещин.

В ряде работ [3–8] показан также положительный эффект от введения добавок титана и циркония на механические свойства алюминиевых сплавов. Для того чтобы контролировать качество продукции из алюминиевых сплавов, необходимо в том числе контролировать содержание титана и циркония.

В ГОСТ 11739.23–99 для определения циркония при его содержании от 0,002 до 0,5 % (по массе) используется фотометрический метод, а при содержании от 0,5 до 3,0 % (по массе) – титриметрический метод химического анализа [9]. В ГОСТ 11739.20–99 дана методика фотометрического определения титана при его содержании от 0,003 до 0,4 % (по массе) [10]. В ГОСТ 7727–81 описана процедура определения содержания титана от 0,02 до 0,8 % (по массе) и циркония – от 0,03 до 0,3 % (по массе) искровым оптико-эмиссионным методом анализа [11].

Однако классические химические (фотометрический и титриметрический) методы анализа являются одноэлементными, трудоемкими и продолжительными по времени. Оптико-эмиссионный метод требует наличия стандартных образцов, максимально близких по химическому составу к анализируемым пробам, для построения градуировочных зависимостей.

Альтернативой химическим методам и искровому оптико-эмиссионному анализу является атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП), которая предоставляет широкий круг аналитических возможностей по одновременному определению элементов в различных материалах [12–18]. Однако нормативные документы, регламентирующие процедуру определения титана и циркония данным методом, до последнего времени отсутствовали. Содержание титана и циркония в алюминиевых сплавах находится на уровне примесей – от 0,001 до 0,3 % (по массе), поэтому решением актуальной задачи определения титана и циркония в алюминиевых сплавах в этом диапазоне является метод АЭС ИСП.

В данной работе представлена разработка методики АЭС ИСП для определения содержания титана и циркония в алюминиевых сплавах в диапазоне 0,001–1 % (по массе).

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.1. «Фундаментальные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их обработки на период до 2030 года») [19].

### Материалы и методы

Определение содержания титана и циркония проводили на спектрометре Agilent 5100 в режиме аксиального обзора плазмы с мощностью 1,2 кВт в потоке плазмообразующего газа с расходом 12 л/мин при потоке распылителя 0,7 л/мин. Применяли газ аргон марки ВЧ чистотой 99,998 % (объемн.). Взвешивание проб проводили на аналитических весах HR-200. Для валидации методики использовали зарубежные аттестованные стандартные образцы (certified reference materials – CRM) из алюминиевых сплавов марок 269, 416/04, 59X G77J6, 55X G04H3. Отработку методики измерений проводили на алюминиевых сплавах типа Д16 и 1933.

### Результаты и обсуждение

С целью разработки методики измерений содержания титана и циркония в алюминиевых сплавах методом АЭС ИСП проводили подбор оптимальных условий растворения с использованием стандартных образцов из алюминиевых сплавов марок 269, 416/04, 59X G77J6, 55X G04H3 производства фирмы MBH (Великобритания) с аттестованными значениями массовой доли титана и циркония.

С учетом того, что алюминиевые сплавы хорошо растворяются в разбавленных соляной и азотной кислотах, стандартные образцы массой 0,2 г первоначально растворяли в смеси 10 мл H<sub>2</sub>O + 5 мл HCl + 1 мл HNO<sub>3</sub>.

Как правило, растворение сплавов, содержащих цирконий, без применения фтороводородной кислоты приводит к занижению результатов определения этого элемента из-за неполноты его растворения. При этом при растворении 0,2 г алюминиевого сплава в смеси 10 мл H<sub>2</sub>O + 5 мл HCl + 1 мл HNO<sub>3</sub> + 1 мл HF произошло образование осадка – фторида алюминия, что привело к занижению результатов определения титана и циркония, вероятно, вследствие соосаждения этих элементов с фторидом алюминия. При снижении объема фтороводородной кислоты до 0,25 мл осадок не образовывался, при этом полученные методом АЭС ИСП результаты определения содержания титана и циркония не имеют существенных расхождений с аттестованными значениями для стандартных образцов. Результаты определения содержания титана и циркония методом АЭС ИСП приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Результаты определения титана в стандартных образцах из алюминиевых сплавов без фтороводородной кислоты**

Марка стандартного образца	Содержание титана, % (по массе)	
	среднее значение $X_{cp} \pm \Delta$ , полученное методом АЭС ИСП	аттестованное значение $X_{att} \pm \Delta$ для стандартного образца
269	0,1694±0,0013	0,1715±0,0095
416/04	0,0280±0,003	0,0280±0,001
59X G77J6	0,020±0,001	0,020±0,002
55X G04H3	0,105±0,001	0,109±0,003

В дальнейшем растворение образцов из алюминиевых сплавов для определения содержания титана и циркония проводили в смеси 10 мл H<sub>2</sub>O + 5 мл HCl + 1 мл HNO<sub>3</sub> + 0,25 мл HF при нагревании на плите во фторопластовых стаканах. После полного растворения проб раствор количественно переносили в мерные колбы вместимостью 100 мл и доводили до метки бидистиллированной водой. Затем растворы разбавляли и анализировали методом АЭС ИСП.

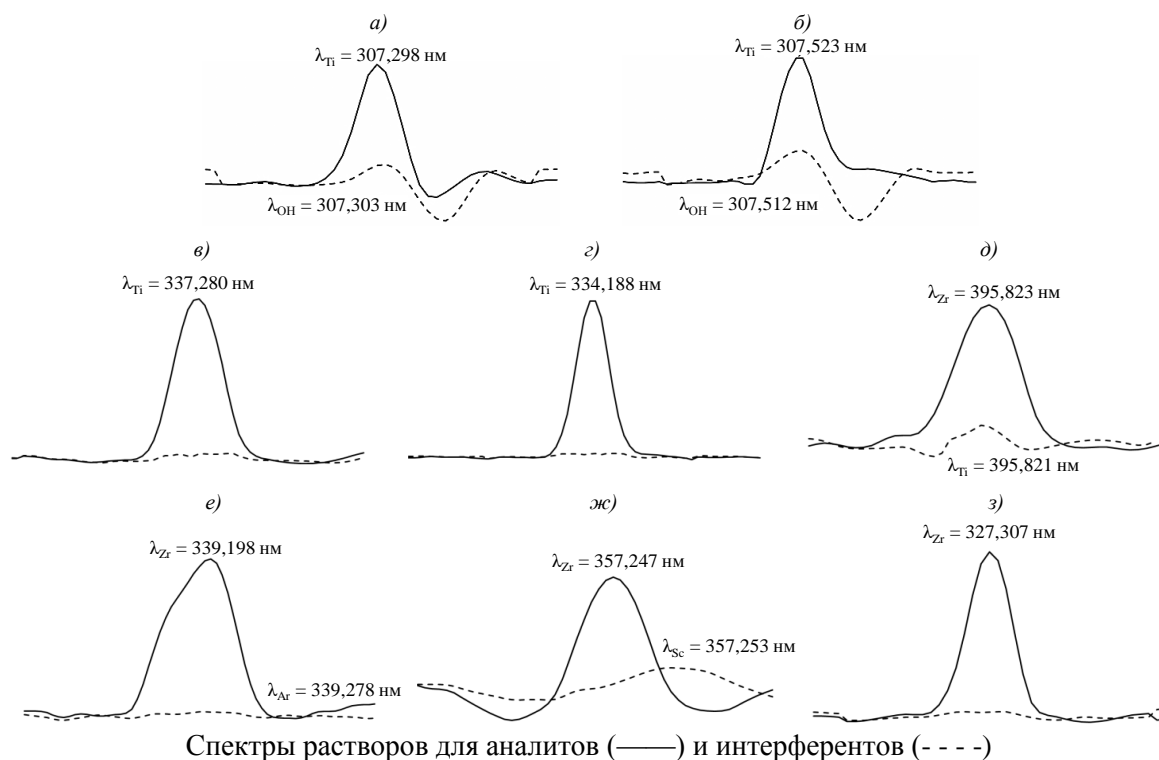
Таблица 2

## Результаты определения циркония в стандартных образцах из алюминиевых сплавов

Состав смеси для растворения	Содержания циркония, % (по массе), в стандартном образце (СО) марки			
	416/04		59X G77J6	
	значение $X_{cp} \pm \Delta$ , полученное методом АЭС ИСП	аттестованное значение $X_{атт} \pm \Delta$ для СО	значение $X_{cp} \pm \Delta$ , полученное методом АЭС ИСП	аттестованное значение $X_{атт} \pm \Delta$ для СО
10 мл H <sub>2</sub> O + + 5 мл HCl + + 1 мл HNO <sub>3</sub>	0,0145±0,0022	0,0201±0,0009	0,155±0,052	0,261±0,006
10 мл H <sub>2</sub> O + + 5 мл HCl + + 1 мл HNO <sub>3</sub> + + 1 мл HF	0,0139±0,0031	0,0201±0,0009	0,256±0,016	0,261±0,006
10 мл H <sub>2</sub> O + + 5 мл HCl + + 1 мл HNO <sub>3</sub> + + 0,25 мл HF	0,0198±0,0011	0,0201±0,0009	0,263±0,003	0,261±0,006

Выбор аналитических линий титана и циркония проводили с использованием модельных растворов. В качестве «холостого» опыта использовали раствор кислот для растворения. Измеряли интенсивности спектральных линий эмиссии аналитов – титана и циркония в растворах, содержащих только титан или цирконий, и в растворах, содержащих потенциальные мешающие элементы – интерференты (Al, Cu, Mg, Mn, Fe, Zn, Sc).

На рисунке представлены виды спектров вблизи аналитических линий с длиной волны  $\lambda$  для титана и циркония, полученные при измерении аналитического сигнала от растворов аналита и интерферентов (Al, Cu, Mg, Mn, Fe, Zn, Sc).



С учетом спектров, представленных на рисунке, выбраны линии с длиной волны  $\lambda$  для определения титана и циркония в алюминиевых сплавах (табл. 3), которые имеют наименьшее влияние интерферентов и наиболее интенсивные.

Аналитические линии для определения титана и циркония в алюминиевых сплавах

Элемент	Аналитическая линия $\lambda$ , нм
Ti	334,941; 337,280; 334,188
Zr	339,198; 327,307; 327,927

Для выбранных аналитических линий оценены пределы определения титана и циркония. Максимальные пределы определения содержания циркония и титана составили 0,0001 и 0,0005 % (по массе) соответственно. Выбран объем аликвотных частей и разбавления для определения титана и циркония: 2,5 мл добавляли в колбу вместимостью 50 мл для диапазона содержания от 0,2 до 1 % (по массе); 20 мл – в колбу 25 мл для содержания от 0,001 до 0,2 % (по массе).

Введение в анализируемые растворы элемента внутреннего стандарта позволяет уменьшить негативное влияние нестабильности распылительной системы спектрального оборудования и различий в солевом составе анализируемых растворов. Элементы, используемые для внутреннего стандарта, не должны содержаться в исследуемых сплавах, но должны иметь свободные от интерференций линии эмиссии. Для использования в качестве внутреннего стандарта при определении титана и циркония в алюминиевых сплавах выбран индий.

Для оценки метрологических характеристик методики измерений по РМГ 61–2010 [20] использовали модельные растворы, являющиеся образцами сравнения, опорные значения которых охватывали весь диапазон содержаний титана и циркония. Из каждого образца сравнения с концентрацией 2 г/дм<sup>3</sup> разные операторы химического анализа в разное время отбирали по шесть аликвотных частей и проводили определение титана и циркония (всего четыре эксперимента).

Рассчитывали среднее арифметическое значение ( $X_{ml}$ ) и стандартное квадратическое отклонение (СКО) –  $S_{ml}$ , а также выборочную дисперсию  $S_{ml}^2$  результатов единичного анализа содержаний компонента в  $m$ -м образце, полученных в условиях повторяемости, т. е. при параллельных определениях (табл. 4):

$$\bar{X}_{ml} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{mli}}{N}, \quad S_{ml}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{mli} - X_{ml})^2}{N-1},$$

где  $m = 1 \dots M$ ;  $l = 1 \dots L$ .

Таблица 4

Стандартное квадратическое отклонение повторяемости по четырем экспериментам

Опорное значение, % (по массе)	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
0,001 (Ti)	0,000014	0,000006	0,000014	0,000013
0,003 (Ti)	0,000031	0,000049	0,000051	0,000031
0,01 (Ti)	0,000035	0,000051	0,000027	0,000019
0,05 (Ti)	0,000378	0,000165	0,000309	0,000315
0,3 (Ti)	0,001957	0,001022	0,000824	0,001936
1,0 (Ti)	0,004067	0,003232	0,003172	0,003024
0,001 (Zr)	0,000034	0,000013	0,000015	0,000024
0,003 (Zr)	0,000026	0,000063	0,000042	0,000049
0,01 (Zr)	0,000049	0,000041	0,000032	0,000026
0,05 (Zr)	0,000401	0,000191	0,000355	0,000330
0,3 (Zr)	0,001871	0,000634	0,000493	0,000290
0,5 (Zr)	0,001757	0,001323	0,000657	0,001498

Затем полученные данные проверяли на наличие выбросов – существенных отклонений от опорных значений – с использованием критерия Кохрена. Неисключенные по результатам проверки из расчетов результаты ( $S_{ml}^2$ ) считали однородными и по ним оценивали СКО, характеризующее повторяемость результатов единичного анализа (параллельных определений), полученных для содержания, соответствующего содержанию компонента в  $m$ -м образце сравнения. Эти значения СКО (табл. 5) рассчитывали по формуле

$$S_{r,m} = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L S_{ml}^2}{L}}.$$

Показатель повторяемости методики анализа в виде среднего квадратического отклонения ( $\sigma_r$ ) для содержаний, соответствующих содержанию компонента в  $m$ -м образце сравнения, устанавливали, принимая равным  $\sigma_r \approx S_{r,m}$ .

Показатель повторяемости методики анализа в виде предела повторяемости  $r_{n,m}$  для содержания, соответствующего содержанию компонента в  $m$ -м образце сравнения, рассчитывали по формуле

$$r = Q(P, n) \sigma_r,$$

где  $n$  – число параллельных определений, предусмотренных методикой для получения результата анализа,  $Q(P, n) = 3,18$  при  $n = 3$ ,  $P = 0,95$ .

Выборочное значение СКО результатов анализа  $m$ -го образца сравнения, полученное в условиях воспроизводимости (табл. 5), рассчитывали по формуле

$$S_{RX,m} = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L (X_{ml} - X_m)^2}{L-1} + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{N}\right) S_{r,m}^2}, \quad \text{при } m = 1 \dots M.$$

Показатель воспроизводимости методики анализа в виде среднего квадратического отклонения ( $\sigma_R$ ) для содержаний, соответствующих содержанию компонента в  $m$ -м образце сравнения, устанавливали, принимая равным  $\sigma_R \approx S_{R,m}$  (табл. 5).

Показатель воспроизводимости методики анализа в виде предела воспроизводимости ( $R_m$ ) для содержания, соответствующего содержанию компонента в  $m$ -м образце сравнения, рассчитывали по формуле (табл. 5):

$$R_m = Q(P, 3) \sigma_{R,m},$$

где  $Q(P, 3) = 3,18$  при  $P = 0,95$ .

Показатель точности в виде абсолютной погрешности (табл. 5) находили по формуле  $\Delta = 1,96\sigma_R$ .

Для удобства использования метрологических характеристик из абсолютных значений рассчитаны относительные значения метрологических характеристик, а также выбраны два поддиапазона, в которых значения показателя точности изменяются в 2 раза. Результаты оценки метрологических характеристик методики, выраженные в относительных процентах, представлены в табл. 6.

Таблица 5

## Метрологические характеристики методики измерений (абсолютные значения)

Опорное значение, % (по массе)	$\sigma_r \approx S_{r,m}$	$r_m$	$\sigma_R \approx S_{R,m}$	$R_m$	$\Delta$
0,001 (Ti)	0,000012	0,000038	0,000013	0,000042	0,00008
0,003 (Ti)	0,000042	0,000133	0,000035	0,000111	0,00022
0,01 (Ti)	0,000035	0,000111	0,000053	0,000168	0,00033
0,05 (Ti)	0,000302	0,000961	0,000270	0,000857	0,00168
0,3 (Ti)	0,001525	0,004849	0,002053	0,006529	0,01280
1,0 (Ti)	0,003398	0,010806	0,004547	0,014461	0,02834
0,001 (Zr)	0,000023	0,000074	0,000034	0,000108	0,00021
0,003 (Zr)	0,000047	0,000150	0,000042	0,000133	0,00026
0,01 (Zr)	0,000038	0,000121	0,000050	0,000161	0,00031
0,05 (Zr)	0,000329	0,001046	0,000268	0,000853	0,00167
0,3 (Zr)	0,001028	0,003270	0,001601	0,005090	0,00998
0,5 (Zr)	0,001371	0,004358	0,002200	0,00699	0,01371

Таблица 6

## Метрологические характеристики методики определения титана и циркония в алюминиевых сплавах методом АЭС ИСП

Элемент	Диапазон измеряемых значений, % (по массе)	Показатель точности $\pm\delta$ , %, при $P = 0,95$	Показатель повторяемости $\sigma_r$ , %	Показатель воспроизводимости $\sigma_R$ , %	Предел повторяемости $r$ , %, при $P = 0,95$ и $n = 2$
Ti	От 0,001 до 0,05 включительно	9	2,5	6	7,5
	Свыше 0,05 до 1 включительно	5	1,5	2,5	4
Zr	От 0,001 до 0,01 включительно	25	6	19	21
	Свыше 0,01 до 0,05 включительно	9	2,5	6	7,5
	Свыше 0,05 до 0,5 включительно	5	1,5	2,5	4

Разработанная методика измерений для АЭС ИСП превосходит в 2–3 раза по пределу определения и в 4 раза по метрологическим характеристикам методики, приведенные в ГОСТ 11739–99 и ГОСТ 7727–81 (табл. 7).

Таблица 7

## Сравнение показателей повторяемости методик измерений

Элемент	Содержание элемента, % (по массе)	Показатели повторяемости, % (отн.)		
		по методике измерения АЭС ИСП	по ГОСТ 11739–99	по ГОСТ 7727–81
Ti	0,01	2,5	10	15
	0,1	1,5	7	10
Zr	0,01	2,5	20	15
	0,1	1,5	7	10

Для проверки правильности разработанной методики при определении титана и циркония использовали зарубежные стандартные образцы категории CRM из алюминиевых сплавов. Аттестованные значения содержания титана и циркония в образцах CRM и результаты, полученные методом АЭС ИСП, представлены в табл. 1. Правильность полученных результатов оценивали по критерию Стьюдента при  $P = 0,95$  и  $n = 4$  – между результатами АЭС ИСП анализа и аттестованными значениями для образцов CRM отсутствуют значимые расхождения в значениях.

### Заключения

Таким образом, разработана методика определения титана и циркония в алюминиевых сплавах методом АЭС ИСП. Ввиду особенностей химических свойств титана и циркония, для их определения в алюминиевых сплавах стандартное растворение с применением соляной кислоты не подходит. Растворение алюминиевого сплава для определения титана и циркония необходимо проводить в присутствии фтороводородной кислоты. Экспериментально подобраны аналитические линии для определения титана и циркония. Выбран элемент в качестве внутреннего стандарта – индий. Проведены исследования метрологических характеристик методики с использованием модельных растворов: для содержаний титана и циркония от 0,05 до 0,3 % (по массе) показатель повторяемости составляет 1,5 % (отн.), а показатель промежуточной прецизионности равен 2,5 % (отн.), показатель точности составляет 5 % (отн.), что полностью обеспечивает возможность проведения аналитического контроля содержания титана и циркония в продукции из сплавов типа Д16 и 1933. Разработанная методика измерений превосходит в 2 раза по пределу определения и в 4 раза по метрологическим характеристикам (пределу повторяемости) химические методы анализа.

### Библиографический список

1. Мальцева Т.В., Озерец Н.Н., Левина А.В., Ишина Е.А. Цветные металлы и сплавы: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 176 с.
2. Кузнецов А.О., Оглодков М.С., Климкина А.А. Влияние химического состава на структуру и свойства сплава системы Al–Mg–Si // Труды ВИАМ. 2018. № 7 (67). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-3-9.
3. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.07.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
4. Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
5. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Оглодкова Ю.С., Оглодков М.С. Опыт и перспективы применения алюминий-литиевых сплавов в изделиях авиационной и космической техники // Металлург. 2021. № 1. С. 62–70.
6. Бенариев И., Бер Л.Б., Антипов К.В., Сбитнева С.В. Тенденции развития деформируемых сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu). Часть 1 (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 14–22. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-14-22.
7. Колобнев Н.И. Жаропрочность алюминиевых деформируемых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 1 (40). С. 32–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-32-36.
8. Prasad N.E., Gokhale A., Wanhill R.J.H. Aluminium-lithium alloys: processing, properties, and applications. Oxford: Elsevier, 2013. 608 p.

9. ГОСТ 11739.23–99. Сплавы алюминиевые литейные и деформируемые. Метод определения циркония. М.: Изд-во стандартов, 2000. 7 с.
10. ГОСТ 11739.20–99. Сплавы алюминиевые литейные и деформируемые. Метод определения титана. М.: Изд-во стандартов, 2000. 7 с.
11. ГОСТ 7727–81. Сплавы алюминиевые. Методы спектрального анализа. М.: Изд-во стандартов, 2002. 26 с.
12. Карпов Ю.А., Барановская В.Б. Аналитический контроль – неотъемлемая часть диагностики материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1-1. С. 5–12.
13. Загвоздкина Т.Н., Карачевцев Ф.Н., Дворецков Р.М., Якимова М.С. Определение кремния в алюминиевых сплавах методом АЭС–ИСП в сочетании с микроволновой подготовкой // Труды ВИАМ. 2014. № 12. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-10-10.
14. Молчан Н.В., Конкевич В.Ю., Фертиков В.И. Контроль структурных изменений алюминиевого сплава 1379п, полученного по гранульной технологии, методом атомно-эмиссионной спектроскопии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 2. С. 42–45.
15. Карпов Ю.А., Барановская В.Б. Проблемы стандартизации методов химического анализа в металлургии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1–2. С. 5–14.
16. Карпов Ю.А. Аналитический контроль металлургического производства. М.: Металлургия, 1995. С. 97–107.
17. Отто М. Современные методы аналитической химии: в 2 т. М.: Техносфера, 2003. Т. I. 416 с.
18. Дворецков Р.М., Уридия З.П., Карачевцев Ф.Н., Загвоздкина Т.Н. Определение химического состава магниевых сплавов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой // Труды ВИАМ. 2019. № 12 (84). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-88-98.
19. 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.
20. РМГ 61–2010. Государственная система обеспечения единства измерений. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки. М.: Изд-во стандартов, 2010. 41 с.