

УДК 543.51; 669.1

Ф.Н. Карачевцев<sup>1</sup>, С.Г. Ерошкин<sup>1</sup>, И.В. Мостяев<sup>1</sup>, М.В. Акинина<sup>1</sup>, А.В. Славин<sup>1</sup>**РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ СОСТАВА  
МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ МАРОК ВМЛ20 И ВМД16**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-39-47

*Разработана технология изготовления и производства материала стандартных образцов (СО) состава магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16. Во ФГУП «ВНИИОФИ» проведены испытания материала СО с целью утверждения их типа, а также метрологическая экспертиза. Оформлены заключения по проверке результатов испытаний СО состава указанных сплавов и выданы свидетельства об утверждении типа стандартных образцов. Комплекты СО утвержденного типа государственных стандартных образцов высокопрочных магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16 имеют относительную погрешность аттестованных значений массовой доли элементов в диапазоне от 0,5 до 5 % (по массе) не более 5 % отн.*

**Ключевые слова:** стандартный образец, магниевые сплавы, спектроскопия, технология изготовления, утверждение типа стандартных образцов, неопределенность.

F.N. Karachevtsev<sup>1</sup>, S.G. Eroshkin<sup>1</sup>, I.V. Mostayev<sup>1</sup>, M.V. Akinina<sup>1</sup>, A.V. Slavin<sup>1</sup>**DEVELOPMENT OF STANDARD SAMPLES  
OF MAGNESIUM ALLOYS VML20 AND VMD16**

*A technology for the manufacture and production of reference material (CRM) of the composition of magnesium alloys of the VML20 and VMD16 grades has been developed. In FSUE «VNIIOFI» tests of CRM material were carried out in order to approve their type, as well as metrological examination. Conclusions were drawn up on checking the results of CRM testing for the composition of the indicated alloys and certificates of type approval of reference materials were issued. CRM sets of the approved type of state standard samples of high-strength magnesium alloys of VML20 and VMD16 grades have a relative error of the certified values of the mass fraction of elements in the range from 0.5 to 5% (by weight) no more than 5% rel.*

**Keywords:** standard sample, magnesium alloys, spectroscopy, manufacturing technology, type approval of reference materials, uncertainty.

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

**Введение**

Как конструкционные материалы магниевые сплавы обладают рядом преимуществ по сравнению со сплавами на других основах: высокими удельными прочностью и жесткостью; хорошими усталостными свойствами; стабильностью механических свойств и размеров при длительном хранении благодаря отсутствию склонности к коррозии; способностью работать в широком диапазоне температур от  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $300\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$  – кратковременно и до  $200\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$  – длительно; высокой демпфирующей способностью; хорошим тепловым и противозвучным экранированием и др. Данные свойства востребованы для изделий авиационной, космической и оборонной промышленности. Применение магниевых сплавов позволяет повысить весовую эффективность элементов конструкции летательных аппаратов, увеличить дальность полета и полезную массу изделий, улучшить их тактико-технические характеристики и ресурс работы

[1, 2]. При этом замена деталей и узлов из алюминиевых сплавов на магниевые приводит к снижению массы этих конструктивных элементов на 25–30 %.

В настоящее время за рубежом возрастает интерес к магниевым сплавам с позиции их применения в летательных аппаратах, где по своим характеристикам они могут успешно конкурировать даже с композиционными углепластиковыми [3–6].

Наиболее перспективными деформируемыми магниевыми сплавами для использования в изделиях авиакосмической техники являются магниевые сплавы нового поколения, легированные редкоземельными элементами, с улучшенными характеристиками прочности при комнатной и повышенных температурах (до 300 °С), такие как сплав марки ВМД16 [7].

Для обеспечения единства измерений и контроля качества материалов и полуфабрикатов из них необходимо изготовление стандартных образцов (СО) состава сплавов [8, 9].

Цель настоящей работы – разработка СО состава высокопрочных магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16, которые позволяют проводить анализ материала магниевых сплавов в ходе производственной плавки для оперативной корректировки состава.

Современное химико-аналитическое оборудование (оптико-эмиссионный спектрометр Magellan Q8 и рентгенофлуоресцентный анализатор типа S8 Tiger) позволяет проводить такой анализ. Однако корректные и достоверные результаты на таком оборудовании можно получить только при наличии СО состава соответствующих марок сплавов. В настоящее время в отрасли отсутствуют комплекты СО состава для спектрального анализа высокопрочных магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16 [10–12].

Основными задачами при изготовлении СО являются: разработка технологии выплавки их материала, которая обеспечивала бы получение однородного материала заданного химического состава, изготовление и выпуск комплектов СО, а также проведение испытаний с целью утверждения их типа.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

### Материалы и методы

Объектами исследования являются образцы высокопрочных магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16.

Измерения проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 5100 с аксиальным обзором плазмы по методикам МИ 1.2.078–2018 и МИ 1.2.079–2018 [14, 15]. Масс-спектрометрические исследования выполняли на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCapQc по МИ 1.2.080–2018. Измерения осуществляли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре Varian 240FS по ГОСТ 3240. Исследование однородности распределения элементов в материале СО проводили на спектрометре Magellan Q8 оптико-эмиссионным методом анализа по ГОСТ 7728–79.

### Результаты и обсуждение

#### *Разработка технологии выплавки материала СО состава магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16*

На основании опыта выплавки высокопрочных магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16 на технологической базе ФГУП «ВИАМ» выбраны технологические параметры выплавки СО состава указанных сплавов, обеспечивающие максимальную однородность распределения элементов в материале.

Выполнен расчет шихтового материала для плавки сплава марки ВМД16.

Проведена отработка технологических режимов выплавки и термической обработки (ТО) материала СО состава высокопрочных магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16, а именно способов введения основных легирующих элементов и примесей: сначала вводили чушковой магний, далее цинк, медь и кальций, а затем лигатуры магний–цирконий, магний–иттрий и лантан.

Для выплавки состава 1 сплава марки ВМД16 (далее – состав ВМД16-1) использовали лигатуру магний–иттрий (32 %), изготовленную в газовом горне из металлического иттрия; для выплавки состава 2 сплава марки ВМД16 (далее – состав ВМД16-2) – производственную лигатуру магний–иттрий (19 %). После каждого введения легирующего элемента производили тщательное перемешивание расплава, а зеркало расплавленного металла покрывали флюсом. Во время присадки легирующих компонентов и перемешивания расплава возникали очаги горения, поэтому поверхность расплава присыпали иттриевым флюсом.

Установлено, что химический состав ВМД16-1 близок к расчетному составу. При выплавке состава ВМД16-2 отработывали введение примесей, при этом кальций усвоился на 30 % от введенного количества, медь усвоилась полностью, а кремний и железо не усвоились. Никель и кремний в составе ВМД16-1 перешли из лигатуры магний–иттрий. Таким образом, кальций и медь вводятся в состав СО магниевого сплава в чистом виде, никель – через лигатуру магний–иттрий, а железо и кремний – в виде ферросилиция, что проведено на СО сплава марки ВМД16.

Выполнена отработка технологических режимов ТО материала СО состава высокопрочного магниевых сплава марки ВМД16 по трем режимам – гомогенизация при температурах 390 °С (ТО1), 440 °С (ТО2) и 370, а затем 450 °С (ТО3).

Наименьшие отклонения результатов определения легирующих элементов в материале СО получены на образцах после термообработки по режиму ТО2 с помощью метода оптико-эмиссионного анализа (табл. 1).

Таблица 1

**Стандартное квадратическое отклонение (СКО) результатов определения легирующих элементов в материале стандартных образцов (СО) состава сплава марки ВМД16 после термической обработки (ТО)**

Режим ТО	СКО результатов определения элементов, %			
	Zn	Zr	La	Y
ТО1	1,1	1,1	1,0	1,0
ТО2	0,7	0,8	0,6	0,7
ТО3	1,3	1,4	0,6	0,6
Без ТО	2,0	2,0	1,6	1,6

Выполнен расчет шихтового материала для плавки сплава марки ВМЛ20.

Проведен выбор способов введения основных легирующих элементов и примесей. Сначала вводили чушковой магний, далее цинк, кадмий и висмут, а затем медь, ферросилиций, никель в виде порошка и алюминий в виде стружки. Потом вводили лигатуры магний–цирконий и ниобий–титан. После каждого введения легирующего элемента производили тщательное перемешивание расплава, при этом поверхность расплавленного металла защищали флюсом.

Исследовали химический состав слитков сплава марки ВМЛ20 (табл. 2).

Таблица 2

**Химический состав стандартных образцов (СО) сплава марки ВМЛ20**

Индекс СО	Массовая доля элементов, % (по массе)										
	Zr	Cd	Zn	Cu	Ni	Bi	Al	Fe	Nb	Ti	Si
ВМЛ20-1	0,713	0,711	6,59	0,0017	0,0120	0,0203	–	0,0180	0,0065	0,0074	0,0030
Расчетный	0,700	0,700	6,50	–	0,0100	0,0400	–	0,0500	0,0400	0,0400	0,0100
ВМЛ20-2	0,806	0,381	7,79	0,0540	0,0014	0,0920	0,006	0,0010	0,0150	0,0170	0,0011
Расчетный	0,800	0,360	7,50	0,0500	–	0,1000	0,010	–	0,1000	0,1000	–

Установлено, что химические составы ВМЛ20-1 и ВМЛ20-2 близки к расчетным. Железо и кремний усвоились на 30 % от введенного количества, медь и никель усвоились полностью, алюминий – на 50 %, а ниобий и титан – на 20 %.

Проведена отработка технологических режимов ТО материала СО состава высокопрочного магниевых сплава марки ВМЛ20 по трем режимам (с различной продолжительностью закалки, охлаждения в воде, старения и охлаждения на воздухе):

– ТО1: закалка при температуре 540 °С, охлаждение в воде при температуре 80–90 °С, старение при температуре 205 °С, охлаждение на воздухе;

– ТО2: закалка при температуре 540 °С, охлаждение в воде при температуре 80–90 °С, старение при температуре 205 °С, охлаждение на воздухе;

– ТО3: закалка при температуре 540 °С, охлаждение на воздухе, старение при температуре 205 °С, охлаждение на воздухе.

Наименьшие отклонения результатов определения элементов с помощью метода оптико-эмиссионного анализа в материале СО получены на образцах после термообработки по режиму ТО3 (табл. 3).

Таблица 3

**Стандартное квадратическое отклонение (СКО) результатов определения легирующих элементов в материале стандартных образцов (СО) состава сплава марки ВМЛ20 после термической обработки (ТО)**

Режим ТО	СКО результатов определения элементов, %		
	Zn	Zr	Cd
ТО1	1,2	1,7	0,7
ТО2	1,3	1,8	0,4
ТО3	1,2	1,8	0,3
Без ТО	2,0	2,4	1,4

На основании полученных результатов исследований разработаны технологические инструкции (ТИ), которые являются руководством по изготовлению СО состава высокопрочных магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16, устанавливают требования к оборудованию, шихтовым материалам, безопасности и охраны окружающей среды, а также регламентируют технологический процесс изготовления СО, включающий:

– выплавку из шихтовых материалов заготовок из магниевых сплавов марок ВМЛ20 в индукционной печи и ВМД16 в печи шахтного типа с газовым обогревом;

– заливку слитков в чугунные изложницы;

– механическую обработку поверхности слитков;

– искусственное старение слитков из сплава марки ВМЛ20, гомогенизационный отжиг слитков из сплава марки ВМД16;

– изготовление СО из слитков на токарно-винторезном станке.

*Разработка и выпуск комплектов СО типа ГСО  
состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМЛ20*

По разработанной ТИ изготовлены СО состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМЛ20 для спектрального анализа в форме цилиндров диаметром 40 мм и высотой 20 мм.

Проведено определение химического состава полученных СО методом атомно-эмиссионного анализа: составы полученных СО имеют разброс по содержанию легирующих элементов и примесей, что позволяет выполнить калибровку спектрального оборудования.

Исследована однородность распределения химических элементов в полученном материале СО состава сплава марки ВМЛ20 по ГОСТ 8.531–2002 опико-эмиссионным методом на спектрометре Q8 Magellan. Исследовано по 11 образцов от каждого химического состава, проведено по два измерения с каждой рабочей поверхности. На основании результатов анализа получены значения характеристик однородности материала СО состава сплава марки ВМЛ20 и переданы во ФГУП «ВНИИОФИ» для расчетов их метрологических характеристик.

Для проведения испытаний в целях утверждения типа ФГУП «ВИАМ» передало во ФГУП «ВНИИОФИ» один комплект СО состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМЛ20.

Определен химический состав указанного комплекта СО в целях утверждения их типа с применением государственного первичного эталона ГЭТ 196–2015 с использованием методов атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой и атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометрах Ultima 2 и AA 280FS.

На основании результатов исследований химического состава материала СО, проведенных различными методами анализа во ФГУП «ВИАМ» и ФГУП «ВНИИОФИ», оценены метрологические характеристики (аттестованная характеристика – массовая доля элементов и абсолютная погрешность аттестованных значений) в соответствии с РМГ 53–2002 «ГСИ. Стандартные образцы. Оценка метрологических характеристик с использованием эталонов и образцовых средств измерений».

В соответствии с требованиями ГОСТ 8.315–97 и ГОСТ 8.753–2011 выполнена метрологическая экспертиза документов (протоколов испытаний материалов СО и исследования однородности СО состава сплава марки ВМЛ20, проекта описания типа, паспорта и этикетки), переданных ФГУП «ВИАМ» во ФГУП «ВНИИОФИ».

Оформлены заключения по проверке результатов испытаний СО состава сплава марки ВМЛ20, выдано свидетельство № 5704 от 11.10.2018 об утверждении их типа.

Выпущено 10 комплектов СО утвержденного типа (ГСО 11137–2018) состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМЛ20 со свидетельством об утверждении типа, его описанием и паспортом, которые имеют метрологические характеристики, приведенные в табл. 4 и 5.

Таблица 4

**Аттестованная характеристика стандартных образцов (СО)  
состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМЛ20**

Индекс СО	Массовая доля элементов, % (по массе)										
	Zn	Zr	Cd	Bi	Nb	Ti	Al	Ni	Cu	Fe	Si
ВМЛ20-1	7,00	0,56	0,579	0,0001	0,0009	0,0011	0,0009	0,0010	0,0009	0,0010	0,0070
ВМЛ20-2	7,47	0,49	0,620	0,0860	0,0083	0,0088	0,0017	0,0100	0,0009	0,0016	0,0160
ВМЛ20-3	6,32	0,55	0,070	0,0580	0,0032	0,0032	0,0056	0,0074	0,0130	0,0012	0,0031

Таблица 5

**Абсолютная погрешность аттестованных значений стандартных образцов (СО) состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМЛ20 (при доверительной вероятности 0,95)**

Индекс СО	Абсолютная погрешность массовой доли элементов, % (по массе)										
	Zn	Zr	Cd	Bi	Nb	Ti	Al	Ni	Cu	Fe	Si
ВМЛ20-1	0,28	0,02	0,026	0,00002	0,00024	0,0004	0,0001	0,00016	0,0004	0,00020	0,0004
ВМЛ20-2	0,22	0,02	0,030	0,00700	0,00220	0,0016	0,0006	0,00260	0,0003	0,00050	0,0026
ВМЛ20-3	0,22	0,02	0,004	0,00800	0,00090	0,0008	0,0012	0,00140	0,0030	0,00025	0,0007

На рисунке представлен комплект СО утвержденного типа высокопрочного магниевого сплава марки ВМЛ20, представляющих собой цилиндры диаметром 40 мм и высотой 20 мм.



Комплект стандартных образцов состава сплава марки ВМЛ20

Комплекты СО утвержденного типа состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМЛ20 имеют относительную погрешность аттестованных значений массовой доли элементов в диапазоне от 0,5 до 5 % (по массе) не более 5 % отн., что соответствует требованиям ТЗ.

*Разработка и выпуск комплектов СО типа ГСО  
состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМД16*

По разработанной ТИ изготовлены СО состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМД16 для спектрального анализа в форме цилиндров диаметром 40 мм и высотой 20 мм.

Проведено определение химического состава полученных СО методом атомно-эмиссионного анализа (табл. 6).

Таблица 6

**Химический состав стандартных образцов (СО) состава сплава марки ВМД16**

Индекс СО	Массовая доля элементов, % (по массе)								
	Y	Zr	La	Zn	Cd	Ca	Ni	Fe	Si
ВМД16-1	7,14	0,160	1,260	0,630	0,640	0,0220	0,0200	0,0016	0,0011
ВМД16-2	5,88	0,627	0,478	1,200	0,021	0,0063	0,0010	0,0019	0,0013
ВМД16-3	4,75	0,310	0,343	2,090	0,025	0,0160	0,0040	0,0028	0,0015

Результаты анализа показали, что составы полученных СО имеют разброс по содержанию легирующих элементов и примесей, это позволяет выполнить калибровку спектрального оборудования.

Исследована однородность распределения химических элементов в полученном материале СО состава сплава марки ВМД16 по ГОСТ 8.531–2002 оптико-эмиссионным методом на спектрометре Q8 Magellan. Исследовано по 11 образцов от каждого химического состава, проведено по два измерения с каждой рабочей поверхностью. На основании результатов анализа однородности в соответствии с методикой расчета,

приведенной в ГОСТ 8.531–2002, получены значения характеристик однородности материала СО состава сплава марки ВМД16. Результаты определения однородности переданы во ФГУП «ВНИИОФИ» для расчетов их метрологических характеристик.

Для проведения испытаний в целях утверждения типа ФГУП «ВИАМ» передало во ФГУП «ВНИИОФИ» комплект СО состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМД16.

Определен химический состав комплекта СО состава указанного сплава в целях утверждения типа с применением государственного первичного эталона ГЭТ 196–2015 методами атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и атомно-абсорбционной спектрометрии на спектрометрах Ultima 2 и AA 280FS (протокол испытаний № ИСП-38 от 30.09.2019).

На основании результатов исследований химического состава материала СО, проведенных различными методами анализа во ФГУП «ВИАМ» и ФГУП «ВНИИОФИ», оценены метрологические характеристики (аттестованная характеристика – массовая доля элементов и абсолютная погрешность аттестованных значений) в соответствии с РМГ 53–2002 «ГСИ. Стандартные образцы. Оценка метрологических характеристик с использованием эталонов и образцовых средств измерений».

В соответствии с требованиями ГОСТ 8.315–97 и ГОСТ 8.753–2011 выполнена метрологическая экспертиза документов (протоколов испытаний материалов СО и исследования однородности СО состава сплава марки ВМД16, проекта описания типа, паспорта и этикетки), переданных ФГУП «ВИАМ» во ФГУП «ВНИИОФИ».

Оформлены заключения по проверке результатов испытаний СО состава указанного сплава, выдано свидетельство № 6349 от 19.11.2019 об утверждении их типа.

Выпущено 10 комплектов СО утвержденного типа (ГСО 11422–2019) состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМД16 со свидетельством об утверждении типа, его описанием и паспортом, которые имеют метрологические характеристики, приведенные в табл. 7 и 8.

Таблица 7

**Аттестованная характеристика стандартных образцов (СО) состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМД16**

Индекс СО	Массовая доля элементов, % (по массе)									
	Y	Zr	La	Zn	Cd	Ca	Ni	Cu	Fe	Si
ВМД16-1	7,03	0,150	1,224	0,66	0,690	0,022	0,0200	0,0012	0,0020	0,0012
ВМД16-2	5,77	0,643	0,459	1,26	0,018	0,008	0,0010	0,0008	0,0018	0,0013
ВМД16-3	4,67	0,300	0,331	2,25	0,020	0,014	0,0038	0,0012	0,0016	0,0016

Таблица 8

**Абсолютная погрешность аттестованных значений стандартных образцов (СО) состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМД16 (при доверительной вероятности 0,95)**

Индекс СО	Абсолютная погрешность массовой доли элементов, % (по массе)									
	Y	Zr	La	Zn	Cd	Ca	Ni	Cu	Fe	Si
ВМД16-1	0,13	0,040	0,016	0,02	0,010	0,002	0,0010	0,0003	0,0010	0,0002
ВМД16-2	0,09	0,011	0,019	0,05	0,002	0,003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002
ВМД16-3	0,14	0,040	0,007	0,06	0,002	0,002	0,0007	0,0002	0,0005	0,0004

Комплекты СО утвержденного типа состава высокопрочного магниевого сплава марки ВМД16 имеют относительную погрешность аттестованных значений массовой доли элементов в диапазоне от 0,5 до 5 % (по массе) не более 5 % отн., что соответствует требованиям ТЗ.

### Заключения

Разработаны технологии изготовления материала СО состава высокопрочных магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16, обеспечивающие получение однородных СО заданного химического состава и основанные на выплавке в газовом горне с последующим разливом в цилиндрические чугунные изложницы. Определены последовательность и способы введения при определенной температуре основных легирующих элементов и примесей в материал СО сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16. Отработаны технологические режимы ТО материала СО состава указанных сплавов: температура и продолжительность выдержки при гомогенизации сплава марки ВМД16 и при закалке/старении сплава марки ВМЛ20, обеспечивающие наименьшее отклонение результатов изменений элементов в материале СО: в диапазоне от 0,6 до 0,8 % отн. – для сплава марки ВМД16 и от 0,3 до 1,8 % отн. – для сплава марки ВМЛ20.

По разработанным ТИ изготовлены СО состава высокопрочных магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16 в форме цилиндров диаметром 40 мм и высотой 20 мм для спектрального анализа. Определен химический состав полученных СО.

С применением государственного первичного эталона ГЭТ 196–2015 проведены испытания в целях утверждения типа СО составов высокопрочных магниевых сплавов марок ВМД16 и ВМЛ20, рассчитаны метрологические характеристики СО по ГОСТ 8.532–2002. В соответствии с требованиями ГОСТ 8.315–97 и ГОСТ 8.753–2011 выполнена метрологическая экспертиза документов (протоколов испытаний материалов СО и исследования однородности СО состава сплавов марок ВМД16 и ВМЛ20, проектов описания типа и паспорта). Проведена проверка текстов проектов методик на соответствие требованиям ГОСТ 8.563–2009.

Выпущены комплекты СО типа ГСО состава высокопрочных магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16 (по 10 шт. каждого сплава) со свидетельствами об утверждении типа, его описаниями и паспортами. Данные комплекты СО имеют относительную погрешность аттестованных значений массовой доли элементов в диапазоне от 0,5 до 5 % (по массе) не более 5 % отн., что соответствует требованиям ТЗ.

Разработанные СО позволят проводить анализ данных сплавов оптико-эмиссионным методом, при котором не используется растворение проб в кислотах, что в свою очередь снизит трудоемкость по сравнению с использованием атомно-эмиссионного метода анализа с индуктивно связанной плазмой в ~3 раза, а энергозатраты – в ~3,5 раза.

### Библиографический список

1. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № S2. С. 3–10.
3. Дуюнова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. Динамика развития магниевых и литейных алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
4. Мухина И.Ю., Уридия З.П., Трофимов Н.В. Коррозионностойкие литейные магниевые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 15–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-15-23.
5. Леонов А.А., Трофимов Н.В., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Тенденции развития литейных магниевых сплавов с повышенной температурой воспламенения (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 2 (96). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-3-9.

6. Волкова Е.Ф., Дуюнова В.А. Эффект применения нестандартной технологии деформации к некоторым серийным магниевым сплавам // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 3 (42). С. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-17-23.
7. Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Акинина М.В. Сравнительный анализ анизотропии механических свойств и микроструктуры деформированных полуфабрикатов из высокопрочных магниевых сплавов с РЗЭ // *Труды ВИАМ*. 2018. № 5 (65). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-24-33.
8. 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.
9. Луценко А.Н., Перов Н.С., Чабина Е.Б. Новые этапы развития Испытательного центра // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 460–468. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-460-468.
10. Карпов Ю.А., Барановская В.Б. Аналитический контроль – неотъемлемая часть диагностики материалов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 1-I. С. 5–12.
11. Карпов Ю.А. Аналитический контроль металлургического производства. М.: Металлургия, 1995. С. 97–107.
12. Отто М. *Современные методы аналитической химии: в 2 т.* М.: Техносфера, 2003. Т. 1. 416 с.
13. 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.
14. Farfías J.C., Rucandio I., Pomares-Alfonso M.S. et al. Determination of rare earth and concomitant elements in magnesium alloys by inductively coupled plasma optical emission spectrometry // *Talanta*. 2016. No. 154. P. 53–62. DOI: 10.1016/j.talanta.2016.03.047.
15. Дворецков Р.М., Барановская В.Б., Карачевцев Ф.Н., Летов А.Ф. Определение редкоземельных металлов в магниевых сплавах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой // *Измерительная техника*. 2019. № 4. С. 62–66.