

УДК 669.018.44

Ф.Н. Карачевцев<sup>1</sup>, А.Ф. Летов<sup>1</sup>, О.М. Проценко<sup>1</sup>, М.С. Якимова<sup>1</sup>**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПЛАВОВ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-8-8

*Контроль химического состава сплавов в условиях современного металлургического производства проводят оптико-эмиссионным методом анализа. Однако на точность результатов анализа существенное влияние оказывают матричные эффекты и спектральные наложения. Минимизировать систематические ошибки можно путем применения стандартных образцов (СО), близких по химическому составу к составу анализируемого сплава. В связи с этим разработка и применение стандартных образцов состава новых перспективных сплавов являются актуальными задачами. Приведены сведения о проводимых во ФГУП «ВИАМ» работах в области разработки стандартных образцов состава перспективных сплавов авиационного назначения, а также о новых разработанных СО.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** стандартные образцы, сплавы, технологии изготовления.

*Control of a chemical composition of alloys in conditions of modern metallurgical production is carried out by an optical emission analysis method. However, matrix effects and spectral interferences significantly impact on the accuracy of analysis results. It is possible to minimize systematic errors using certified reference materials (CRM's) with similar chemical composition to the analyzed alloy. Therefore the development and application of CRM's of composition of new advanced alloys is an actual task. This work presents information on CRMs of composition of advanced aviation alloys which developed in FSUE «VIAM».*

*The work is executed within implementation of the complex scientific direction 2.1. «Fundamentally oriented research» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** certified reference materials, alloys, production technology.

<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**

Всероссийский институт авиационных материалов (ВИАМ) занимается разработкой и производством стандартных образцов (СО) жаропрочных никелевых сплавов более 60 лет. Разработаны следующие перспективные жаропрочные сплавы: ВЖЛ21, ВЖМ4, ВЖМ7, ВЖМ8 и ВИН3. Сплав ВЖМ7 (плотность 8,39 г/см<sup>3</sup>) обладает высокой фазовой стабильностью, повышенными характеристиками прочности ( $\sigma_{\text{в}}^{20^{\circ}} = 1040$  МПа) и жаропрочности ( $\sigma_{100}^{1000^{\circ}} = 220$  МПа). Сплав ВЖМ7 с КГО [001] рекомендуется для изготовления рабочих лопаток газотурбинных двигателей, эксплуатирующихся при температурах с 1100°C с кратковременными забросами до 1150°C [2]. Сплав ВИН3 обладает высокой фазовой стабильностью по характеристикам прочности при температурах 900–1200°C. Сплав ВИН3 с КГО [001] рекомендуется для изготовления рабочих и сопловых

лопаток газотурбинных двигателей, эксплуатирующихся при температурах до 1200°C с кратковременными забросами до 1250°C [3].

Во ФГУП «ВИАМ» также разработаны деформируемые алюминиевые сплавы нового поколения авиационного назначения: В-1167, В-1977, В-1461, В-1469, В-1480, В-1481. Алюминий-литиевые сплавы третьего поколения В-1461, В-1480, В-1481, легированные цинком, являются улучшенными модификациями сплавов второго поколения 1420 и 1460 и обладают повышенной технологичностью при изготовлении изделий, в частности прессованных полуфабрикатов. Свариваемые сплавы В-1480, В-1481 и В-1461 пониженной плотности характеризуются повышенной удельной прочностью, коррозионной стойкостью, повышенными характеристиками малоциклового усталости и вязкости разрушения и рассматриваются в качестве альтернативы сплавам 1163-Т и В950.ч.-Т2 [4, 5]. Рекомендуется применять полуфабрикаты из этих сплавов в конструкции фюзеляжа и крыла самолета.

Для быстрого и успешного внедрения новых перспективных сплавов в производство на предприятиях отрасли, во ФГУП «ВИАМ» проводятся разработка и выпуск СО для контроля химического состава заготовок и изделий из перспективных сплавов [6–10].

Контроль качества продукции проводят оптико-эмиссионным методом анализа. Данный метод основан на измерении интенсивности характеристических линий эмиссии определяемых элементов при воздействии плазмы искры на монолитный образец контролируемого материала. Метод отличается простотой и низкой стоимостью оборудования, широкими диапазонами определяемых концентраций элементов, простотой пробоподготовки и скоростью анализа, что позволяет проводить экспресс-анализ в процессе выплавки сплавов. Однако оптико-эмиссионный метод имеет свои недостатки: на эффективность возбуждения элементов влияет матричный состав сплавов (чем более тугоплавкий сплав, тем меньше интенсивность линий эмиссии), на точность результатов анализа существенное влияние оказывают спектральные наложения на аналитические линии определяемых элементов спектральных линий элемента основы и легирующих элементов. Минимизировать систематические ошибки, связанные с указанными недостатками метода, можно путем применения для калибровки спектрометров стандартных образцов, близких по химическому составу к составу анализируемого материала. При этом необходимо, чтобы аттестованные значения массовой доли легирующих элементов и примесей перекрывали регламентированные техническими условиями (ТУ) допуски по содержанию элементов в анализируемом сплаве. Использование СО составов, которые не обеспечивают выполнение последнего требования, либо проведение измерений по заводским калибровкам (производителей спектрального оборудования) приводит к существенным ошибкам при измерении химического состава новых сплавов.

Ошибки, проявляющиеся при определении химического состава без применения СО измеряемого сплава, иногда соизмеримы с величинами интервалов легирования элементов в новых сплавах. В таких условиях затруднительно проводить корректировку шихты в процессе выплавки. Применение контрольного образца (например, СО предприятия) не всегда позволяет правильно устранить систематические ошибки применения. В соответствии с ФЗ №102 для проведения измерений, относящихся к сфере государственного метрологического надзора, необходимо использовать СО утвержденных по ГОСТ 8.753 типов, а также аттестованные по ГОСТ 8.563 [11, 12] методики измерений.

### Материалы и методы

Во ФГУП «ВИАМ» накоплен большой опыт по разработке СО различных типов, отличающихся по перечню и содержанию контролируемых элементов. Разработаны и

выпущены 19 типов монолитных ГСО для спектрального анализа сплавов на различных основах в виде комплектов. Перечень разработанных (с 2006 по 2012 г.) ГСО состава сплавов для спектрального анализа представлены в работах [9]. Стандартные образцы сплавов утвержденных типов выпускают, как правило, в виде комплектов, состоящих из нескольких экземпляров СО, имеющих форму цилиндра, с диаметром аналитической поверхности 30–45 мм и высотой до 40 мм.

Переход к технологии изготовления СО в виде цилиндров был сопряжен с рядом технологических сложностей, а именно отливки плотного материала из жаропрочных никелевых сплавов. Так, например, при выплавке металла в вакуумных индукционных печах с последующей заливкой в стальные трубы диаметром 90 мм и длиной 300 мм в материале никелевого сплава образуются усадочные раковины, а также поры размером до 150 мкм (рис. 1), что недопустимо для оптико-эмиссионного спектрального анализа.

С целью получения плотного и бездефектного материала СО (рис. 2) проводится переплав на установках направленной кристаллизации. Заготовку материала СО при этом расплавляют и заливают в литейные формы, после чего форму с расплавленным металлом с контролируемой скоростью (2–30 мм/мин) опускают в расплавленный алюминий. Материал СО кристаллизуется фронтом без образования крупных пор, при этом получают заготовки диаметром 42 мм и длиной 230 мм (рис. 3).

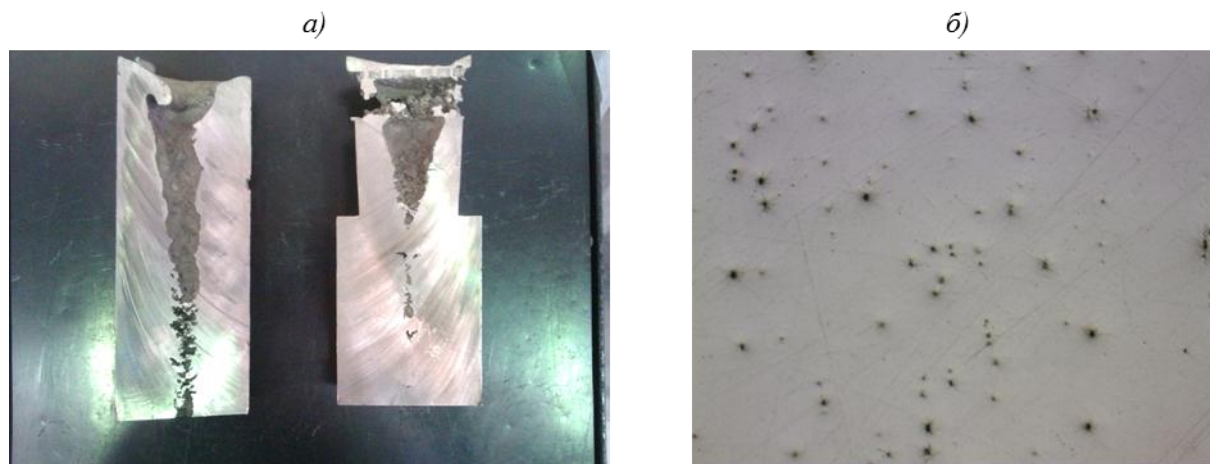


Рис. 1. Усадочные раковины (а) и область пористости (б) в отливке из жаропрочного никелевого сплава



Рис. 2. Макроструктура материала стандартного образца жаропрочного никелевого сплава



Рис. 3. Заготовки стандартного образца никелевого сплава, полученные методом направленной кристаллизации

Применение вышеприведенной технологии обеспечивает однородность распределения легирующих элементов и примесей в материале СО (величина отклонения содержания каждого элемента не превышает 1,5% относительно среднего значения). Значения неопределенности (погрешности) от неоднородности СО состава сплава ВЖМ7, рассчитанные по ГОСТ 8.531 [13] на основании результатов исследования образцов рентгенофлуоресцентным методом, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Неопределенность от неоднородности стандартного образца состава сплава ВЖМ7**

Стандартный образец	Содержание элементов, % (отн.)					
	Al	Cr	Co	W	Mo	Ta
ВЖМ7-1	0,8	0,8	0,7	1,5	0,2	1,3
ВЖМ7-2	0,8	0,8	0,6	1,4	0,3	1,4
ВЖМ7-3	0,7	0,7	0,8	1,3	0,2	0,6
ВЖМ7-4	0,5	0,5	0,5	0,8	0,6	0,5
ВЖМ7-5	1,0	1,0	0,9	1,5	0,2	1,1

В полученном материале СО отсутствуют усадочные раковины и зоны пористости. Выход годного материала СО повысился с 10–20 до 70–85%.

Для разработки и изготовления стандартных образцов состава алюминиевых сплавов В-1167, В-1461, В-1469, В-1480, В-1481 и В-1977, используемых для спектрального анализа, отработаны технологии выплавки и термической обработки материала стандартных образцов.

С целью выбора технологических параметров, обеспечивающих максимальную однородность распределения элементов в материале стандартных образцов, проведена отработка технологических режимов выплавки, термической обработки и деформации материалов СО с использованием технологических приемовковки и прессования.

Для отработки технологии изготовления стандартных образцов выплавлены материалы сплавов В-1167, В-1461, В-1480 и В-1977 среднего химического состава. Выплавка материала СО осуществлялась в электрической печи сопротивления с использованием шамотно-графитового тигля. При проведении плавки в тигель сначала загружали куски чушкового алюминия, после расплава которого вводили чистые металлы и лигатуры при соответствующих температурах. После тщательного перемешивания и

снятия шлака расплав разливали в водоохлаждаемую изложницу диаметром 70 мм (получено по четыре слитка каждого сплава).

Для устранения последствий дендритной ликвации, снятия литейных напряжений и получения стабильной равновесной структуры по сечению слитков проведена их гомогенизация:

- для сплава В-1167: одноступенчатый отжиг с охлаждением на воздухе;
- для сплавов В-1461, В-1480 и В-1977: двухступенчатый отжиг с охлаждением на воздухе.

Для дальнейшей проработки структуры проведены ковка и прессование слитков из сплавов В-1167 и В-1461 на прессе «Блисс» с усилием 1000 тс. Изготовлены по два прутка и две поковки из каждого сплава.

Дляковки использовали литые заготовки диаметром 70 мм и длиной 140 мм. Ковку проводили по сложной схеме №1: осадка заготовки на 0,5 Н и протяжка вдоль оси слитка на размер 140×100×40 мм. Полученные поковки из сплавов В-1167 и В-1461 разрезаны на заготовки (рис. 4, а), из которых изготавливали образцы диаметром 40 мм и высотой 20 мм.

Прессование проводили при температурах 420–430°C (выдержка в печи в течение 2 ч) с исходного диаметра 70 мм на конечный диаметр прутков 45 мм. Коэффициент вытяжки составил ~2,4. От прутков отрезали выходной и утяжинный концы (рис. 4, б). Полученные прессованные прутки разрезали на заготовки (рис. 5), из которых затем изготавливали стандартные образцы сплавов В-1167 и В-1461 диаметром 40 мм и высотой 30 мм.

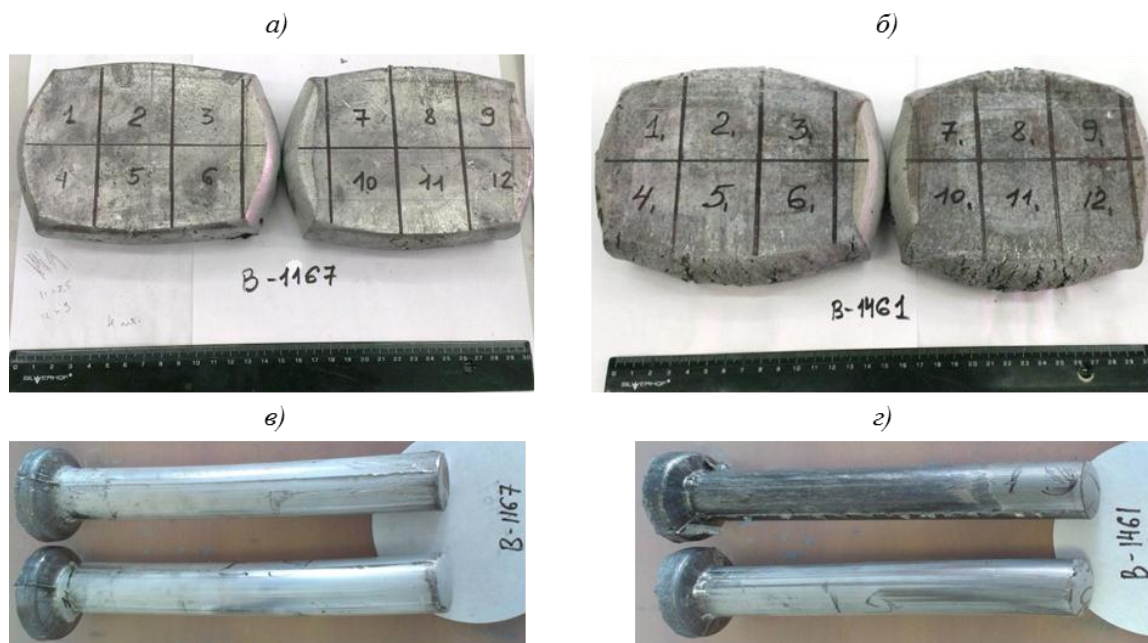


Рис. 4. Поковки (а, б) и прутки (в, г) из сплавов В-1167 и В-1461

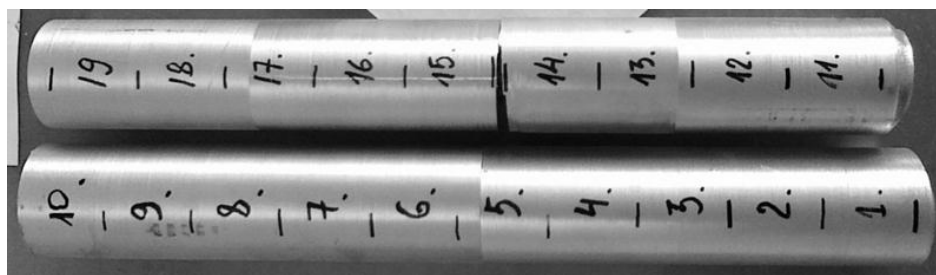


Рис. 5. Заготовка материала стандартного образца из сплава В-1461

Полученные из поковок и прутков заготовки СО сплавов В-1167 и В-1461 обрабатывали на токарных станках до диаметра 40 мм, а затем разрезали.

Проведено исследование химического состава поковок и прутков из сплавов В-1167 и В-1461. Определение химического состава материалов СО проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре с индуктивно-связанной плазмой. Полученные значения содержания элементов близки к расчетным, что свидетельствует о корректности технологических режимов отливки сплавов.

Исследована макро- и микроструктура слитков и прутков материала СО состава алюминиевого В-1167 и алюминий-литиевого В-1461 сплавов. Установлено, что макро-структура слитков из сплава В-1167 плотная, визуальных дефектов металлургического происхождения (трещины, неметаллические включения, грубая пористость и т. п.) не обнаружено. На шлифах слитков из сплава В-1461 отсутствуют крупные поры и включения, ближе к поверхности слитка наблюдаются отдельные мелкие поры (<0,5 мм). В целом макро-структура однородная, мелкозернистая, что характерно для сплава, легированного модифицирующими добавками Zr, Mn и Sc. Макроструктура прутков из сплавов В-1461 и В-1167 мелкозернистая, плотная, характерная для прессованных полуфабрикатов из этих сплавов. Исследования микроструктуры прутков из сплавов В-1167 и В-1461 показали, что крупных включений интерметаллидных фаз и нерастворившихся неравновесных эвтектик не обнаружено, что свидетельствует о структурной однородности полученного материала.

По результатам ультразвуковых исследований материала СО состава алюминиевого В-1167 и алюминий-литиевого В-1461 сплавов ручным контактным ультразвуковым эхо-импульсным методом на дефектоскопе УСД-60 установлено, что на заготовках из сплавов В-1167 и В-1461, полученных послековки, обнаружены несплошности, расположенные вблизи поверхности без механической обработки, максимальная глубина залегания которых составляет 3,7 и 5,6 мм соответственно. После механической обработки образца из сплава В-1461 (удаление поверхностного слоя ~6 мм) дефектов не обнаружено. На образцах из сплавов В-1167 и В-1461, полученных после прессования, несплошностей не обнаружено.

Проведено исследование однородности распределения химических элементов в полученном материале СО сплавов В-1167 и В-1461 рентгенофлуоресцентным (на спектрометре S4 EXPLORER) и оптико-эмиссионным (на спектрометре Q8 Magellan) методами по ГОСТ 7727–81. Сделаны по два параллельных измерения каждой рабочей поверхности. На основании результатов исследования в соответствии с методикой расчета, приведенной в ГОСТ 8.531–2002, получены значения характеристик однородности ( $S_n$ ) и допустимые значения характеристик однородности ( $S_n^{доп}$ ) материала СО сплавов В-1167 и В-1461, которые представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Значения характеристик однородности ( $S_n$  и  $S_n^{доп}$ ) материала стандартного образца сплава В-1167**

Технология деформации ( $S_n$ )	Характеристики однородности для элементов, %							
	Cu	Mg	Mn	Zr	Sc	Ni	Ti	Ag
Ковка	0,40	0,079	0,004	0,0022	0,0008	0,0017	0,0035	0,0038
Прессование	0,07	0,015	0,003	0,0006	0,0002	0,0001	0,0003	0,0006
$S_n^{доп}$	0,09	0,032	0,012	0,0012	0,0007	0,0002	0,0009	0,0012

Таблица 3

**Значения характеристик однородности ( $S_n$  и  $S_n^{доп}$ ) материала  
стандартного образца сплава В-1461**

Технология деформации ( $S_n$ )	Характеристики однородности для элементов, %									
	Cu	Mg	Mn	Zr	Sc	Ni	Ti	Zn	Li	Cr
Ковка	0,39	0,044	0,0012	0,0026	0,0018	0,013	0,0028	0,021	0,068	0,0013
Прессование	0,06	0,006	0,0009	0,0006	0,0003	0,002	0,0006	0,004	0,028	0,0002
$S_n^{доп}$	0,07	0,012	0,0071	0,0021	0,0014	0,002	0,0024	0,010	0,032	0,0007

Для оценки приемлемости однородности полученного материала СО сплавов рассчитаны допустимые значения характеристик однородности. Исходя из требований ГОСТ 7727–81, относительная погрешность определения элементов не должна превышать 15% при их содержании от 0,0005 до 0,01% (по массе), 8% – от 0,01 до 0,1% (по массе), 3% – свыше 0,1% (по массе).

Установлено, что значения характеристик однородности  $S_n$  материала СО (табл. 2 и 3), полученного с применениемковки, по ряду элементов превышают допустимые значения, что указывает на неоднородность распределения элементов в материале. Напротив, значения  $S_n$  в образцах из сплавов В-1167 и В-1461, полученных с применением прессования, не превышают допустимых значений, что свидетельствует об однородности распределения элементов в данных материалах.

### Результаты

По результатам исследований разработаны технологии и выпущены технологические инструкции на выплавку и термическую обработку материала стандартных образцов состава сплавов ВЖМ4, В-1167, В-1461, В-1469, В-1480, В-1481 и В-1977, которые устанавливают требования к оборудованию, шихтовым материалам, безопасности и охране окружающей среды, а также регламентируют технологический процесс выплавки слитков, гомогенизационного отжига, деформации (прессование) с получением прутков диаметром 45 мм, закалки, искусственного старения и последующей механической обработки стандартных образцов до размера  $\varnothing 40 \times 30$  мм.

По разработанным технологическим инструкциям изготовлены стандартные образцы состава сплавов ВЖЛ21, ВЖМ4, ВЖМ7, ВЖМ8, ВИНЗ, В-1167, В-1461, В-1469, В-1480, В-1481 и В-1977 размерами  $\varnothing 40 \times 30$  мм. Для изготовления стандартных образцов выбраны и рассчитаны по пять химических составов каждого сплава. Выбор и расчет шихтовых составов СО проведен с учетом охвата всего диапазона содержания основных легирующих элементов и примесей по ТУ и ОСТ, а также с учетом их содержания выше и ниже пределов, указанных в ТУ и ОСТ (на 10–15% (отн.) – при содержании элементов от 1 до 5% (по массе) и на 50–100% (отн.) – при содержании элементов менее 1% (по массе)). Изготовленные на основании данного расчета стандартные образцы позволят определить состав производственных плавов и сделать заключение об их соответствии требованиям ТУ и ОСТ.

Исследование химического состава комплектов СО состава сплавов ВЖЛ21, ВЖМ4, ВЖМ7, ВЖМ8, ВИНЗ, В-1167, В-1461, В-1469, В-1480, В-1481 и В-1977 проводили методами атомно-абсорбционной спектрометрии, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой [14, 15], масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой [16], оптико-эмиссионной спектрометрии. Полученные данные показывают хорошую сходимость результатов определения содержания элементов различными методами и использованы для оценки метрологических характеристик СО сплавов В-1167, В-1461, В-1469, В-1480, В-1481 и В-1977.

Для проведения испытаний в целях утверждения типа, ФГУП «ВИАМ» передало во ФГУП «ВНИИОФИ» по одному комплекту СО сплавов ВЖЛ21, ВЖМ4, ВЖМ7, ВЖМ8, ВИНЗ, В-1167, В-1461, В-1469, В-1480, В-1481 и В-1977 (по пять образцов – пяти химических составов каждого сплава в виде монолитного образца и стружки). Испытания проводили методами атомно-эмиссионной спектromетрии с индуктивно-связанной плазмой и атомно-абсорбционной спектromетрии на спектromетрах Ultima 2 и AA 280FS, входящих в состав Государственного первичного эталона единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твердых веществах и материалах на основе спектральных методов ГЭТ 196-2011.

По результатам испытаний установлено, что погрешность аттестованных значений содержания элементов в комплектах ГСО сплавов В-1167, В-1461, В-1469 В-1480, В-1481 и В-1977 в диапазоне от 0,5 до 5% (по массе) соответствует требованиям ТЗ и составляет не более 5% (отн.).

За 2014–2015 гг. разработаны 10 новых типов СО (табл. 4).

Таблица 4

**Перечень государственных стандартных образцов, выпущенных в ВИАМ в 2014–2015 гг.**

Сплав	ГСО	Основа	Аттестованные элементы
В-1167	10489–2014	Al	Cu, Mg, Mn, Zr, Sc, Ag, Ca, Ti, Ni, Fe, Si
В-1461	10490–2014		Cu, Mg, Mn, Zn, Li, Zr, Be, Sc, Ni, Cr, Fe, Ca, Si, Ti, Ce, Na
В-1469	10491–2014		Cu, Mg, Mn, Li, Zr, Sc, Ag, Fe, Si
В-1977	10594–2015		Zn, Mg, Cu, Zr, Mn, Fe, Si, Cr, Be, Ti, B
В-1480	10595–2015		Cu, Li, Mg, Ag, Zn, Ca, Mn, Zr, Sc, Ti, Ce, Fe, Si
В-1481	10596–2015		Cu, Li, Mg, Ag, Zr, Zn, Ti, Mn, Sc, Fe, Si
ВЖЛ21-ВИ	10626–2015	Ni	Al, Cr, Co, W, Mo, Ta, Ti, C, La, Si, Mn, Fe, P, Zr, B
ВЖМ7-ВИ	10624–2015		Al, Cr, Co, W, Mo, Ta, Re, Ti, Si, Mn, Fe, P, B, Ce, La
ВЖМ8-ВИ	10626–2015		Al, Cr, Mo, W, Ta, Co, Re, Ru, Si, Mn, Fe, P, B
ВИНЗ-ВИ	10627–2015		Al, Cr, Mo, W, Ta, Co, Re, La, Si, Mn, Fe, P, Ce

### Обсуждение и заключения

Разработаны технологии изготовления СО состава сплавов на никелевой и алюминиевых основах, обеспечивающие получение однородного бездефектного материала заданного химического состава, а также налажен выпуск повторных партий СО.

Разработаны и выпущены комплекты стандартных образцов категории ГСО состава жаропрочных (ВЖЛ21, ВЖМ4, ВЖМ7, ВЖМ8 и ВИНЗ) и алюминиевых (В-1167, В-1461, В-1469, В-1480, В-1481 и В-1977) сплавов.

Погрешность аттестованных значений содержания элементов в комплектах ГСО состава сплавов В-1167, В-1461, В-1469, В-1480, В-1481 и В-1977 в диапазоне от 0,5 до 5% (по массе) соответствует требованиям ТЗ и составляет не более 5% (отн.).

Проведена калибровка и построены градуировочные графики на рентгенофлуоресцентном и оптико-эмиссионном спектromетрах с помощью разработанных комплектов СО категории ГСО состава сплавов. Полученные градуировочные зависимости имеют линейный вид, что позволяет произвести градуировку аналитического оборудования для спектрального анализа.

Комплекты стандартных образцов категории ГСО состава перспективных жаропрочных (ВЖЛ21, ВЖМ4, ВЖМ7, ВЖМ8 и ВИНЗ) и алюминиевых (В-1167, В-1461, В-1469, В-1480, В-1481 и В-1977) сплавов могут использоваться для экспресс-контроля химического состава сплавов при производстве полуфабрикатов.

## 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. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В. Новый монокристаллический интерметаллидный жаропрочный (на основе  $\gamma'$ -фазы) сплав для лопаток ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 34–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-34-40.
4. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А. Высокопрочные алюминиевые сплавы // *Цветные металлы*. 2013. №9. С. 63–65.
5. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 183–195.
6. Летов А.Ф., Карачевцев Ф.Н., Гундобин Н.В., Титов В.И. Разработка стандартных образцов состава сплавов авиационного назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 393–398.
7. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнелегированных сплавов с применением эталона // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 9–11.
8. Летов А.Ф., Карачевцев Ф.Н. Опыт разработки стандартных образцов авиационных сплавов // *Мир измерений*. 2012. №8. С. 31–35.
9. Карачевцев Ф.Н., Летов А.Ф., Проценко О.М., Якимова М.С. Разработка стандартных образцов состава авиационных сплавов // *Стандартные образцы*. 2013. №4. С. 30–34.
10. Карачевцев Ф.Н., Рассохина Л.И., Герасимов В.В., Висик Е.М. Получение стандартных образцов для экспресс-анализа жаропрочных никелевых сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2013. №6. С. 18–19.
11. ГОСТ 8.753-2011. ГСОЕИ. Стандартные образцы материалов (веществ). М.: Стандартинформ, 2011. 19 с.
12. ГОСТ 8.563-2009. ГСИ. Методики (методы) измерений. М.: Стандартинформ, 2009. 20 с.
13. ГОСТ 8.531-2002 ГСОЕИ. Стандартные образцы состава монокристаллических и дисперсных материалов. Способы оценивания однородности. М.: Изд-во стандартов, 2002. 15 с.
14. Дворецков Р.М., Карачевцев Ф.Н., Загвоздкина Т.Н., Механик Е.А. Определение химического состава высоколегированных никелевых сплавов авиационного назначения методом АЭС-ИСП в сочетании с микроволновой пробоподготовкой // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2013. Т. 79. №9. С. 6–9.
15. Карачевцев Ф.Н., Дворецков Р.М., Загвоздкина Т.Н. Микроволновая пробоподготовка никелевых сплавов для определения легирующих элементов методом АЭС-ИСП // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №11. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.05.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-11-11.
16. Якимович П.В., Алексеев А.В., Мин П.Г. Определение низких содержаний фосфора в жаропрочных никелевых сплавах методом ИСП-МС // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №10. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.05.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-2-2.