

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-184-195

РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ СОСТАВА ТИТАНА И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

С.Г. Ерошкин¹, А.Н. Швецова¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Разработаны стандартные образцы (СО) состава титана марок VT1-0, VT1-00 и титановых сплавов марок VT6, VT6ch, OT4-0, OT4-1, OT4. Изготовлена партия материала СО. Проведены исследования однородности и стабильности материала СО с использованием метода ускоренного старения. Определены аттестованные значения и относительные погрешности аттестованных значений СО. Проведены испытания материала СО и утверждены типы СО. Разработана программа испытаний СО титана и титановых сплавов серийного выпуска.

Ключевые слова: стандартные образцы, титан, титановые сплавы, спектральный анализ, химический анализ, ускоренное старение, опико-эмиссионная спектрометрия

Для цитирования: Ерошкин С.Г., Швецова А.Н. Разработка стандартных образцов состава титана и титановых сплавов // Труды ВИАМ. 2026. № 9 (163). С. 184–195. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-184-195.

Scientific article

DEVELOPMENT OF CERTIFIED REFERENCE MATERIALS FOR TITANIUM AND TITANIUM ALLOY COMPOSITION

S.G. Eroshkin¹, A.N. Shvetsova¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Certified reference materials (CRMs) of titanium grades VT1-0 and VT1-00, as well as of titanium alloys VT6, VT6ch, OT4-0, OT4-1, and OT4 have been developed. A batch of CRM material has been manufactured. Homogeneity studies and stability studies of the CRM material have been carried out using the accelerated aging method. The certified values of the CRMs and the relative error of the certified values have been determined. The CRM material has been tested for type approval, and the CRM types have been approved. A test program for serial production of CRMs of titanium and titanium alloys has been developed.

Keywords: certified reference materials, titanium, titanium alloys, spectral analysis, chemical analysis, accelerated aging, optical emission spectrometry

For citation: Eroshkin S.G., Shvetsova A.N. Development of certified reference materials for titanium and titanium alloy composition. *Trudy VIAM*, 2026, no. 9 (163), pp. 184–195. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-184-195.

Введение

Благодаря ряду свойств титан и сплавы на его основе широко применяются в различных областях промышленности. Так, прочность титановых сплавов составляет от 700–900 (первые промышленные конструкционные титановые сплавы марок ВТ5, ВТ5-1, ОТ4, ВТ6) до 1300 МПа (сплавы нового поколения марок ВТ23М, ВТ32, ВТ43, ВТ22М, ВТ22И), что соответствует прочности высокопрочных сталей. При этом плотность титана в ~ 2 раза меньше плотности стали. Температурный диапазон эксплуатации деталей из титановых сплавов является одним из самых широких для конструкционных материалов и простирается от криогенных ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) до высоких ($+600\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур [1, 2]. Титановые сплавы имеют высокую коррозионную стойкость в широком диапазоне температур и сред (включая ткани и жидкости живых организмов). Титановые сплавы гипоаллергенны и имеют выраженную способность к остеоинтеграции (образованию прочной связи с костной тканью) [1, 3]. Титан и титановые сплавы являются парамагнетиками и обладают малым температурным коэффициентом линейного расширения (в ~ 2 раза меньше, чем у аустенитных нержавеющей сталей). К недостаткам титановых сплавов можно отнести низкий уровень антифрикционных свойств, склонность к схватыванию при трении, а также проявление ползучести и потери длительной прочности даже при комнатной температуре. Указанные свойства в разной степени проявляются у разных марок титана и титановых сплавов [1, 2].

В российской авиационной промышленности доля титановых деталей в планере самолетов и авиационных двигателях достигает 8–14 и 28–34 % соответственно. В самолетах Ил-76, Ил-86 и Ил-96-300 из сплава ВТ22 изготовлены траверсы, подкосы, шлиц-шарниры и другие детали шасси, что позволило добиться снижения массы на 15–20 % по сравнению со сталью [4]. В двигателях АЛ-31Ф и ПС-90А из титановых сплавов марок ВТ8, ВТ8М, ВТ18У и ВТ25У изготовлены диски и рабочие лопатки компрессора, работающие при температурах до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5]. В отечественном судостроении титан марки ВТ1-0 и титановые сплавы марок ПТ1М, ПТ7М, ПТ3М, ПТ3В, ТЛЗ и ТЛ5 используются для изготовления труб, арматуры, насосов, теплообменников, судовых конструкций (включая корпусные) и гребных винтов для подводных лодок [6]. За рубежом основной объем титановых полуфабрикатов приходится на сплав состава Ti-6Al-4V (аналог отечественного сплава ВТ6), который применяется в самолетах Boeing и Airbus, а также для изготовления глубоководных аппаратов (до 6000 м) и имплантатов в медицине [3, 7]. Благодаря широкому ассортименту титана и титановых сплавов, имеющих необходимый набор свойств, обеспечивается разнообразие условий их применения [2].

Титановые сплавы различаются по назначению, сферам применения, фазовому, элементному составу и др. В России к настоящему времени известно более 30 марок титана и титановых сплавов, включая восемь марок литейных титановых сплавов. Номенклатура полуфабрикатов включает плиты толщиной до 160 мм, листы, прутки, профили, трубы диаметром до 465 мм, поковки массой до 8 т и фасонные отливки [1, 5]. Предметом рассмотрения данной статьи являются титан типа ВТ1 и титановые сплавы типа ОТ4 и ВТ6, требования к химическому составу которых по ГОСТ 19807–91 приведены в табл. 1 (для примесей указано максимальное допустимое значение).

Титан марок ВТ1-0 и ВТ1-00 представляет собой технически чистый титан и относится к α -сплавам. Из титана марок ВТ1-0 и ВТ1-00 изготавливают листы, плиты, прутки, трубы, проволоку и профили. В самолетостроении трубы из титана ВТ1-0

и титанового сплава ОТ4-1 используются для систем кондиционирования воздуха и противообледенительных систем с рабочей температурой до 260–300 °С. Титан марок ВТ1-0 и ВТ1-00 также широко применяется в судостроении, химическом машиностроении и медицине [5]. Титан марки ВТ1Л (литейный вариант, аналог титана ВТ1-0) используется для производства отливок коррозионностойкой арматуры в химической промышленности [8, 9].

Таблица 1

**Требования к химическому составу титана типа ВТ1
и титановых сплавов типа ОТ4, ВТ6**

Сплав	Содержание элемента, % (по массе)										
	Основные компоненты			Примеси							
	Al	V	Mn	Zr	Si	Fe	O	H	N	C	прочие
ВТ1-00	≤0,30	–	–	–	0,08	0,15	0,10	0,008	0,04	0,05	0,10
ВТ1-0	≤0,70	–	–	–	0,10	0,25	0,20	0,010	0,04	0,07	0,30
ОТ4-0	0,4–1,4	–	0,5–1,3	0,30	0,12	0,30	0,15	0,012	0,05	0,10	0,30
ОТ4-1	1,5–2,5	–	0,7–2,0	0,30	0,12	0,30	0,15	0,012	0,05	0,10	0,30
ОТ4	3,5–5,0	–	0,8–2,0	0,30	0,12	0,30	0,15	0,012	0,05	0,10	0,30
ВТ6	5,3–6,8	3,5–5,3	–	0,30	0,10	0,60	0,20	0,015	0,05	0,10	0,30

Сплав ВТ6 относится к $(\alpha + \beta)$ -сплавам состава Ti–6Al–4V и является самым распространенным титановым сплавом в мире. На долю сплава состава Ti–6Al–4V (ВТ6) приходится более 50 % всего производимого в мире титана, а в некоторые годы – до 75 %. Сплав хорошо сваривается многими видами сварки, включая электронно-лучевую и диффузионную [5]. Он обладает высокой вязкостью разрушения и сопротивлением усталости при оптимальной микроструктуре [8]. В двигателестроении из сплава ВТ6 изготавливают диски вентилятора и компрессора низкого давления, рабочие лопатки, кольца и фланцы [5, 8, 10]. Кроме того, сплав широко используется для производства листов, плит, прутков, профилей, поковок и штамповок [8, 11, 12]. Существуют модификации сплава с пониженным содержанием примесей (ВТ6ч, ВТ6кт) для работы при криогенных температурах и повышенных требованиях к вязкости разрушения [5].

Сплавы серии ОТ4 (ОТ4, ОТ4-0, ОТ4-1) относятся к псевдо- α -сплавам системы Ti–Al–Mn. Существуют модификации ОТ4-0 (менее прочный) и ОТ4-1 (промежуточный), а также сплавы с ванадием вместо марганца (ОТ4У, ОТ4В), обладающие меньшей склонностью к водородному охрупчиванию [5]. Благодаря хорошей свариваемости и технологичности сплав ОТ4 является одним из востребованных титановых сплавов для сварных конструкций в самолетостроении [5, 8]. Сплав ОТ4 термически стабилен и не склонен к коррозионному растрескиванию под нагрузкой [3]. Сплав ОТ4-1 предназначен для изготовления деталей, эксплуатируемых при температурах до 350 и 300 °С при длительности работы не более 2000 и 30000 ч соответственно [5]. Из сплавов серии ОТ4 изготавливают листы, плиты, прутки, профили, поковки и штамповки. В авиационной технике сплавы серии ОТ4 применяются для сварных трубопроводов, воздухозаборников, фланцев, обечаек, кронштейнов и деталей крепления. В двигателестроении из этих сплавов изготавливают кольца, опоры подшипников и другие корпусные детали. Сплавы серии ОТ4 также используются в вертолетостроении (противопожарные

перегородки, узлы системы кондиционирования) и ракетно-космической технике (камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя, ферменные конструкции) [5, 8].

Технические требования к полуфабрикатам из титана марки ВТ1-0 и титановых сплавов типа ОТ4 и ВТ6 приведены в соответствующей нормативной документации (ГОСТ 26492–85, ГОСТ 22178–76, ГОСТ 23755–79, ГОСТ 24890–2023, ГОСТ Р 59185–2020, ГОСТ Р 71186–2023, ГОСТ Р 71759–2024 и др.). В части требований к химическому составу сплавов указанные документы ссылаются на ГОСТ 19807–91 или ОСТ 1 90013–81; в части методик, применяемых для контроля химического состава полуфабрикатов (основных компонентов и примесей, за исключением углерода, кислорода, азота, водорода), – на ГОСТ 19863.1–19863.16 (атомно-абсорбционный, титриметрический, гравиметрический, фотометрический методы) и ГОСТ 23902–79 (метод оптико-эмиссионной спектроскопии с искровым возбуждением спектра).

Оптико-эмиссионная спектроскопия с искровым возбуждением спектра отличается значительно меньшей длительностью и трудоемкостью по сравнению с другими методами. По этой причине она является основным методом контроля химического состава титана и титановых сплавов при производстве изделий и полуфабрикатов [13–15].

При реализации метода оптико-эмиссионной спектроскопии с искровым возбуждением спектра массовую долю элементов определяют по предварительно построенным градуировочным зависимостям, которые устанавливают с применением стандартных образцов (СО) состава материалов [15, 16]. Обеспечение СО предприятий отрасли необходимо для организации работ по производству изделий и полуфабрикатов из титана и титановых сплавов. Разработка СО состава титана и титановых сплавов является актуальной задачей [17–19] и включает изготовление материала СО и его испытания (аттестацию). При аттестации СО устанавливают значения аттестованных характеристик (массовой доли химического элемента) и их погрешности [20, 21]. При разработке СО также необходимо обеспечить метрологическую прослеживаемость аттестованных значений к государственному первичному эталону соответствующей единицы величины [22, 23].

В процессе выполнения работы решены следующие задачи:

- выбор технологии выплавки, обеспечивающей получение однородного материала СО заданного химического состава;
- изготовление и выпуск набора СО;
- установление метрологических характеристик СО;
- разработка документации на СО;
- проведение испытаний в целях утверждения типа СО.

Материалы и методы

Объектом исследований является материал СО состава титана и титановых сплавов, изготовленный из титана типа ВТ1-0, ВТ1-00 и титановых сплавов типа ВТ6, ВТ6ч, ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4. Измерения проводили в соответствии с методикой воспроизведения и передачи единиц величин при определении метрологических характеристик СО с применением вторичного эталона единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твердых веществах и материалах на основе спектральных методов (рег. № 2.7.АБП.0006.2023). При проведении измерений для определения аттестованных значений и нестабильности СО использовали атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой в режиме аксиального обзора плазмы. При исследовании неоднородности СО использовали оптико-эмиссионный спектрометр с искровым возбуждением спектра.

Механическую обработку образцов (включая подготовку поверхности монолитных образцов для оптико-эмиссионной спектроскопии) и отбор стружки проводили на токарном станке. Навески СО в виде металлической стружки растворяли в смеси кислот в химически инертных полимерных автоклавах системы микроволнового разложения. Для разбавления кислот применяли дистиллированную воду. Воду нужной чистоты получали путем перегонки на бидистилляторе. Полученные растворы кислот переводили в мерные колбы из полипропилена. Объем измеряли с использованием пипеточных дозаторов и мерной полипропиленовой посуды, массу – с помощью лабораторных неавтоматических весов. Параметры окружающей среды контролировали с помощью автономного термогигрометра.

При установлении градуировочных характеристик для атомно-эмиссионной спектроскопии применяли СО состава растворов элементов (Sn, V, Fe, Mn, Al, Si, Zr) категории СО утвержденного типа, для оптико-эмиссионной спектроскопии – монолитные СО титана и титановых сплавов категории СО утвержденного типа.

Расчет метрологических характеристик СО проводили по РМГ 93–2015 и Р 50.2.058–2007.

Результаты и обсуждение

На основании анализа научно-технической литературы [1, 5, 7, 12] в области выплавки титана марок ВТ1-0, ВТ1-00 и титановых сплавов марок ВТ6, ВТ6ч, ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4 выбраны способ и порядок введения основных легирующих элементов и примесей. Проведен расчет шихтовых составов СО титана и титановых сплавов для выплавки материала. Сплавы ОТ4-0, ОТ4-1 и ОТ4 в совокупности имеют более широкие диапазоны допускаемых значений массовой доли элементов, чем сплавы ВТ6 и ВТ6ч, поэтому принято решение – в состав набора СО включить четыре экземпляра СО сплавов типа ВТ6 и пять экземпляров СО сплавов типа ОТ4. Выбор шихтовых составов выполнен таким образом, чтобы обеспечивался широкий охват диапазонов содержания основных легирующих элементов для титана марок ВТ1-0, ВТ1-00 и титановых сплавов марок ВТ6, ВТ6ч, ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4. На основании выбранных шихтовых составов определены интервалы допускаемых аттестованных значений СО (табл. 2).

Таблица 2

Интервалы допускаемых аттестованных значений стандартных образцов

Индекс стандартного образца	Массовая доля элемента, %						
	Al	V	Sn	Zr	Mn	Si	Fe
ВМГ Т1	0,001–0,5	0,001–0,1	0,001–0,3	0,001–0,3	–	0,0005–0,2	0,001–0,3
ВМГ Т2	4–8	3–6	–	–	–	0,001–0,5	0,01–0,5
ВМГ Т3	5–9	1–3	–	–	–	0,001–0,5	0,01–0,5
ВМГ Т4	3–6	2–4	–	0,5–2	–	0,001–0,5	0,01–0,5
ВМГ Т5	4–8	3–6	–	–	–	0,001–0,5	0,01–0,5
ВМГ Т6	0,4–0,95	–	–	0,01–0,5	0,05–0,5	–	0,01–0,5
ВМГ Т7	1,5–4	–	–	0,01–0,5	0,1–1,5	0,001–0,5	0,01–0,5
ВМГ Т8	3–7	–	–	0,01–0,5	0,5–2,5	0,001–0,5	0,01–0,5
ВМГ Т9	0,05–1	–	–	0,01–1	1–3,5	0,001–0,5	0,01–0,5
ВМГ Т10	1–3	–	–	–	1–2,5	0,001–0,5	0,01–0,5

Допускаемые аттестованные значения разных типов СО отличаются на несколько порядков: например, для алюминия – от 0,001 (для СО с индексом ВМГ Т1) до 9 % (по массе) (для СО с индексом ВМГ Т3). По этой причине нормировать характеристику погрешности аттестованных значений СО целесообразно в относительных величинах. Для выпущенных СО в качестве такой характеристики погрешности выбрана граница допускаемых значений относительной погрешности аттестованных значений СО. Диапазоны допускаемых значений выбраны с учетом требований к СО – рабочим эталонам, предъявляемым государственной поверочной схемой для средств измерений массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов, а также флуоресценции в жидких и твердых веществах и материалах на основе спектральных методов. Допускаемые пределы доверительных границ относительной погрешности для СО, применяемых в качестве рабочих эталонов, составляют 15 %. Соответствие этому требованию является необходимым условием для применения СО при поверке средств измерений. Предел границы 15 % выбран для всех СО и всех элементов, за исключением элементов-примесей (V, Sn, Zr, Si, Fe) в образце ВМГ Т1, для которого достижение относительной погрешности 15 % может быть невозможно для партий с содержанием элементов, близким к нижней допустимой границе. Выбранные границы допускаемых значений относительной погрешности аттестованных значений СО (для уровня доверия $P = 0,95$) приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Границы допускаемых значений относительной погрешности
аттестованных значений стандартных образцов**

Индекс стандартного образца	Границы допускаемых значений относительной погрешности аттестованных значений стандартных образцов, %, для элемента						
	Al	V	Sn	Zr	Mn	Si	Fe
ВМГ Т1	15	40	40	40	–	40	40
ВМГ Т2	15	15	–	–	–	15	15
ВМГ Т3	15	15	–	–	–	15	15
ВМГ Т4	15	15	–	15	–	15	15
ВМГ Т5	15	15	–	–	–	15	15
ВМГ Т6	15	–	–	15	15	–	15
ВМГ Т7	15	–	–	15	15	15	15
ВМГ Т8	15	–	–	15	15	15	15
ВМГ Т9	15	–	–	15	15	15	15
ВМГ Т10	15	–	–	–	15	15	15

Отработаны технологические режимы выплавки материала СО и изготовлены партии материала СО десяти разных химических составов. Для изготовления материала СО применяли технологию плавки в вакуумных дуговых печах с медным кристаллизатором. Прессованные электроды для получения слитков первого перепада изготавливали на гидравлическом прессе из титановой губки с добавлением легирующих элементов в форме чистых металлов и легатур. Для каждого состава проводили по три перепада. Всего получили десять слитков разного химического состава. От полученных слитков отрезали заготовки и обтачивали на токарном станке для получения СО в форме монолитных цилиндров высотой от 20 до 120 мм, диаметром от 10 до 55 мм. Отбор стружки для химического анализа проводили на токарном станке с торцевых поверхностей

изготовленных образцов без применения смазочно-охлаждающих жидкостей. Для каждого элемента каждого СО исследовали однородность и стабильность, определили аттестованные значения.

Для определения характеристик однородности отобрали по 25 проб от СО каждого типа. Для каждой из 25 проб на каждой из двух аналитических поверхностей проводили по два параллельных измерения массовой доли элемента. Обработку результатов измерений, полученных при определении неоднородности СО, и расчет неопределенности от неоднородности материала СО проводили в соответствии с РМГ 93–2015 (раздел 6.3). Результаты расчетов неопределенностей от неоднородности СО приведены в табл. 4.

Таблица 4

Стандартные неопределенности от неоднородности стандартных образцов

Индекс стандартного образца	Стандартные неопределенности от неоднородности стандартных образцов для элемента						
	Al	V	Sn	Zr	Mn	Si	Fe
ВМГ Т1	$3,31 \cdot 10^{-3}$	$3,63 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-3}$	$2,38 \cdot 10^{-3}$	–	$1,52 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т2	$3,37 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$3,19 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т3	$4,49 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	$4,29 \cdot 10^{-3}$	$6,06 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т4	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	–	$6,51 \cdot 10^{-3}$	–	$5,66 \cdot 10^{-3}$	$4,06 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т5	$3,30 \cdot 10^{-2}$	$2,63 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	$3,91 \cdot 10^{-4}$	$6,67 \cdot 10^{-4}$
ВМГ Т6	$1,23 \cdot 10^{-2}$	–	–	$3,05 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-3}$	–	$6,75 \cdot 10^{-4}$
ВМГ Т7	$1,69 \cdot 10^{-2}$	–	–	$4,69 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$3,87 \cdot 10^{-3}$	$7,63 \cdot 10^{-4}$
ВМГ Т8	$3,23 \cdot 10^{-2}$	–	–	$2,01 \cdot 10^{-3}$	$7,98 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т9	$6,82 \cdot 10^{-3}$	–	–	$6,82 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т10	$1,10 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$4,74 \cdot 10^{-4}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$

На стабильность СО влияет химическое взаимодействие материала с окружающей средой, скорость которого зависит от температуры. Для определения стабильности СО применяли метод ускоренного старения. На основании анализа научно-технической литературы выбран предполагаемый срок годности СО (25 лет). Для исследований стабильности от СО каждого состава отобрали по 20 проб, которые поделили случайным образом на 10 пар. Одну пробу из каждой пары выдерживали при 20 ± 1 °С, вторую – при 164 ± 1 °С. Продолжительность выдержки проб приведена в табл. 5.

Таблица 5

Продолжительность выдержки проб для исследований стабильности стандартных образцов

Условный номер проб	Продолжительность выдержки, ч
1–11	1,01
2–12	2,03
3–13	3,04
4–14	4,05
5–15	5,07
6–16	6,08
7–17	7,09
8–18	8,10
9–19	9,12
10–20	10,13

По истечении времени выдержки измеряли массовую долю элемента в каждой пробе из пары. Обработку результатов измерений, полученных при определении нестабильности СО, и расчет неопределенности от нестабильности материала СО проводили в соответствии с Р 50.2.058–2007 (раздел 5.3). По каждому элементу подтверждена гипотеза об отсутствии тренда и установлен срок годности СО (25 лет). Результаты расчета неопределенности от нестабильности СО приведены в табл. 6.

Таблица 6

Стандартные неопределенности от нестабильности стандартных образцов

Индекс стандартного образца	Стандартные неопределенности от нестабильности стандартных образцов для элемента						
	Al	V	Sn	Zr	Mn	Si	Fe
ВМГ Т1	$3,31 \cdot 10^{-3}$	$3,63 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-3}$	$2,38 \cdot 10^{-3}$	–	$1,52 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т2	$3,37 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$3,19 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т3	$4,49 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	$4,29 \cdot 10^{-3}$	$6,06 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т4	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	–	$6,51 \cdot 10^{-3}$	–	$5,66 \cdot 10^{-3}$	$4,06 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т5	$3,30 \cdot 10^{-2}$	$2,63 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	$3,91 \cdot 10^{-4}$	$6,67 \cdot 10^{-4}$
ВМГ Т6	$1,23 \cdot 10^{-2}$	–	–	$3,05 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-3}$	–	$6,75 \cdot 10^{-4}$
ВМГ Т7	$1,69 \cdot 10^{-2}$	–	–	$4,69 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$3,87 \cdot 10^{-3}$	$7,63 \cdot 10^{-4}$
ВМГ Т8	$3,23 \cdot 10^{-2}$	–	–	$2,01 \cdot 10^{-3}$	$7,98 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т9	$6,82 \cdot 10^{-3}$	–	–	$6,82 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т10	$1,10 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$4,74 \cdot 10^{-4}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$

Для определения аттестованных значений методом квартования отбирали по одной пробе материала СО каждого типа в виде стружки. Для каждой пробы проводили по восемь измерений массовой доли элемента. Расчет аттестованных значений СО и их погрешностей проводили в соответствии с Р 50.2.058–2007 (раздел 7.3.2). Результаты определения аттестованных значений СО и неопределенности от способа установления аттестованных значений СО приведены в табл. 7 и 8.

Таблица 7

Аттестованные значения стандартных образцов

Индекс стандартного образца	Массовая доля элемента, %						
	Al	V	Sn	Zr	Mn	Si	Fe
ВМГ Т1	0,162	0,0081	0,087	0,112	–	0,0035	0,110
ВМГ Т2	5,66	3,99	–	–	–	0,089	0,151
ВМГ Т3	6,98	2,18	–	–	–	0,237	0,307
ВМГ Т4	4,22	3,19	–	1,09	–	0,301	0,184
ВМГ Т5	6,20	4,02	–	–	–	0,0210	0,0370
ВМГ Т6	0,64	–	–	0,163	0,175	–	0,0351
ВМГ Т7	2,50	–	–	0,244	0,69	0,210	0,0386
ВМГ Т8	4,98	–	–	0,106	1,40	0,086	0,058
ВМГ Т9	0,360	–	–	0,365	2,21	0,147	0,065
ВМГ Т10	1,89	–	–	–	1,61	0,0207	0,092

Таблица 8

**Стандартные неопределенности от способа установления
аттестованного значения стандартных образцов**

Индекс стандартного образца	Стандартные неопределенности от способа установления аттестованного значения стандартных образцов для элемента						
	Al	V	Sn	Zr	Mn	Si	Fe
ВМГ Т1	$3,74 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$2,43 \cdot 10^{-3}$	—	$7,99 \cdot 10^{-5}$	$2,60 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т2	$1,28 \cdot 10^{-1}$	$8,86 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$3,45 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т3	$1,58 \cdot 10^{-1}$	$4,79 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$5,13 \cdot 10^{-3}$	$7,09 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т4	$8,83 \cdot 10^{-2}$	$7,23 \cdot 10^{-2}$	—	$2,24 \cdot 10^{-2}$	—	$6,75 \cdot 10^{-3}$	$3,72 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т5	$1,46 \cdot 10^{-1}$	$9,24 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$7,62 \cdot 10^{-4}$
ВМГ Т6	$1,45 \cdot 10^{-2}$	—	—	$3,65 \cdot 10^{-3}$	$3,95 \cdot 10^{-3}$	—	$7,21 \cdot 10^{-4}$
ВМГ Т7	$5,52 \cdot 10^{-2}$	—	—	$5,38 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-2}$	$4,76 \cdot 10^{-3}$	$8,05 \cdot 10^{-4}$
ВМГ Т8	$1,07 \cdot 10^{-1}$	—	—	$2,12 \cdot 10^{-3}$	$3,21 \cdot 10^{-2}$	$1,96 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т9	$7,36 \cdot 10^{-3}$	—	—	$7,69 \cdot 10^{-3}$	$4,61 \cdot 10^{-2}$	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-3}$
ВМГ Т10	$4,20 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$3,40 \cdot 10^{-2}$	$4,71 \cdot 10^{-4}$	$1,89 \cdot 10^{-3}$

Расчет границ относительной погрешности аттестованных значений СО для уровня доверия $P = 0,95$ проводили в соответствии с Р 50.2.058–2007 (раздел 8). Результаты расчетов границ относительной погрешности аттестованных значений СО для уровня доверия $P = 0,95$ приведены в табл. 9.

Таблица 9

Относительные погрешности аттестованных значений стандартных образцов

Индекс стандартно- го образца	Относительные погрешности аттестованных значений стандартных образцов, %, для элемента						
	Al	V	Sn	Zr	Mn	Si	Fe
ВМГ Т1	6	10	6	6	—	9	5
ВМГ Т2	5	5	—	—	—	6	6
ВМГ Т3	5	5	—	—	—	5	6
ВМГ Т4	4	5	—	5	—	6	6
ВМГ Т5	5	5	—	—	—	6	5
ВМГ Т6	6	—	—	6	6	—	6
ВМГ Т7	5	—	—	6	6	6	6
ВМГ Т8	4	—	—	6	5	6	5
ВМГ Т9	6	—	—	6	5	6	6
ВМГ Т10	5	—	—	—	4	6	5

Прослеживаемость аттестованных значений СО к единице величины «массовая доля компонента», воспроизводимой Государственным первичным эталоном, обеспечена проведением прямых измерений на вторичном эталоне. Каждый СО выполняет функцию рабочего эталона для каждого аттестованного элемента.

Заключения

Отработана технология изготовления материала СО состава титана марок ВТ1-0, ВТ1-00 и титановых сплавов марок ВТ6, ВТ6ч, ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4, обеспечивающая получение однородных СО заданного химического состава. Выбраны способ и порядок введения основных легирующих элементов и примесей, режимы проведения плавки и порядок механической обработки полученных слитков.

Изготовлена партия СО состава титана марок ВТ1-0, ВТ1-00 и титановых сплавов марок ВТ6, ВТ6ч, ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4 в форме монолитных цилиндров. Проведены испытания в целях утверждения типа СО, включающие исследования однородности, стабильности и определение аттестованных значений СО. Разработаны техническое задание на разработку СО, программа испытаний СО в целях утверждения типа и программа испытаний СО серийного выпуска.

Проведено утверждение типов СО состава титана и титановых сплавов (набор ВМГ Т1–ВМГ Т10). Типы СО утверждены приказом Росстандарта № 678 от 08.04.2026, типам присвоены регистрационные номера ГСО 13217–2026/ГСО 13226–2026. Запись об утверждении типов СО внесена в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

Список источников

1. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. Титан в машиностроении. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.
2. Ночовная Н.А. Перспективы и проблемы применения титановых сплавов // Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов: сб. докл. М., 2007. С. 5–9.
3. Трофимов В.В., Федчишин О.В., Клименов В.А. Титан, сплавы титана и их применение в стоматологии // Сибирский медицинский журнал. 2009. № 3. С. 1–3.
4. Моисеев В.Н., Грибков Ю.А., Захаров Ю.И. Высокопрочные титановые сплавы в авиационных конструкциях // Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов: сб. докл. М., 2007. С. 47–52.
5. Колачев Б.А., Елисеев Ю.С., Братухин А.Г., Талалаев В.Д. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники. М.: Изд-во МАИ, 2001. 412 с.
6. Ушков С.С., Кудрявцев А.С. Применение титановых сплавов в морской технике и транспортной энергетике и перспективы дальнейшего развития // Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов: сб. докл. М., 2007. С. 5–9.
7. Коллингз Е.В. Физическое металловедение титановых сплавов. М.: Металлургия, 1988. 256 с.
8. Илларионов А.Г., Попов А.А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 137 с.
9. Путырский С.В., Плохих А.И., Арисланов А.А., Наприенко С.А., Анисимова А.Ю. Исследование структуры и механических свойств материала со слоистой структурой на основе композиции из титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ47 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 36–50. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.06.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-36-50.
10. Овчинников В.В., Слезко М.Ю., Бабуев М.А. Магнетронное нанесение тонкопленочного покрытия системы Cu–Mo на титановый сплав ВТ6 // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 4 (81). С. 106–117. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.06.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-106-117.
11. Дуюнова В.А., Павлова Т.В., Кашапов О.С., Чучман О.В. Долговечность поковок и штамповок из сплава ВТ6 для деталей газотурбинных двигателей и авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 23–35. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.06.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
12. Дуюнова В.А., Оглодков М.С., Путырский С.В., Кочетков А.С., Зуева О.В. Современные технологии выплавки слитков титановых сплавов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). С. 30–40. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.06.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
13. Юинг Г.В. Инструментальные методы химического анализа. М.: Мир, 1989. 608 с.
14. Орешникова Е.Г. Спектральный анализ. М.: Высшая школа, 1982. 375 с.

15. Отто М. Современные методы аналитической химии. 3-е изд. М.: Техносфера, 2008. 543 с.
16. Филичкина В.А., Скорская О.Л., Муравьева И.В. Методы и средства аналитического контроля материалов. Химические и физико-химические методы аналитического контроля: учеб. пособие. М.: Изд. дом МИСиС, 2015. 107 с.
17. Степановских В.В., Колпакова Е.К., Хузагалеева Р.К. Аналитический контроль сырья и продукции в металлургии на основе применения сертифицированных стандартных образцов // Аналитика. 2024. Т. 14. № 6. С. 488–491. DOI: 10.22184/2227-572X.2024.14.6.488.491.
18. Степановских В.В., Колпакова Е.К., Хузагалеева Р.К. Аналитический контроль материалов черной металлургии на основе применения сертифицированных стандартных образцов, разработанных ЗАО «ИСО» // Стандартные образцы в измерениях и технологиях: тез. докл. VI Междунар. науч. конф. Екатеринбург, 2024. С. 157–158.
19. Летов А.Ф. Применение инструментальных методов анализа для определения химического состава новых авиационных материалов // I Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат–2012»: сб. докл. М., 2007. С. 5–9.
20. Ерошкин С.Г., Орлов Г.В. Исследование однородности материала стандартных образцов деформируемого никелевого сплава ВЖ175-ИД // Труды ВИАМ. 2015. № 8. С. 83–87. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-11-11.
21. Ерошкин С.Г., Дынин Н.В., Орлов Г.В., Петров П.С. Опыт разработки и производства стандартных образцов состава алюминиевого сплава Д16 // Труды ВИАМ. 2017. № 5 (53). С. 50–55. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-6-6.
22. Степановских В.В. Метрологическая прослеживаемость результатов определения химического состава металлургических материалов. Практические вопросы // Аналитика. 2024. Т. 14. № 2. С. 184–186. DOI: 10.22184/2227-572X.2024.14.2.184.186.
23. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнолегированных сплавов с применением эталона // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2. С. 9–11.

References

1. Gorynin I.V., Chechulin B.B. *Titanium in Mechanical Engineering*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990, 400 p.
2. Nochovnaya N.A. Prospects and Problems of Application of Titanium Alloys. *Prospects for the Development and Application of Titanium Alloys for Aircraft, Rockets, Engines, and Ships*: Collection of reports. Moscow, 2007, pp. 5–9.
3. Trofimov V.V., Fedchishin O.V., Klimenov V.A. Titanium, Titanium Alloys, and Their Application in Dentistry. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal*, 2009, no. 3, pp. 1–3.
4. Moiseev V.N., Gribkov Yu.A., Zakharov Yu.I. High-strength titanium alloys in aircraft structures. *Prospects for the development and application of titanium alloys for aircraft, rockets, engines and ships*: collection of reports. Moscow, 2007, pp. 47–52.
5. Kolachev B.A., Eliseev Yu.S., Bratukhin A.G., Talalaev V.D. *Titanium alloys in the design and production of aircraft engines and aerospace technology*. Moscow: MAI Publ. House, 2001, 412 p.
6. Ushkov S.S., Kudryavtsev A.S. Application of titanium alloys in marine engineering and transport energy and prospects for further development. *Prospects for the development and application of titanium alloys for aircraft, rockets, engines and ships*: collection of reports. Moscow, 2007, pp. 5–9.
7. Kollings E.V. *Physical Metallurgy of Titanium Alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1988, 256 p.
8. Illarionov A.G., Popov A.A. *Technological and Operational Properties of Titanium Alloys: A Textbook*. Ekaterinburg: Ural Univ. Press, 2014, 137 p.
9. Putyrskiy S.V., Plokhikh A.I., Arislanov A.A., Naprienko S.A., Anisimova A.Yu. Study of structure and mechanical properties of the laminar structure material based on titanium alloys VT1-0 and VT47. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 36–50. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 02, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-36-50.

10. Ovchinnikov V.V., Slezko M.Yu., Babuev M.A. Magnetron deposition of thin-film coating of the Cu–Mo system on titanium alloy VT6. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 4 (81), pp. 106–117. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 02, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-106-117.
11. Duyunova V.A., Pavlova T.V., Kashapov O.S., Chuchman O.V. Fatigue strength of forgings from VT6 alloy for parts of gas turbine engines and aircrafts. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 23–35. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 02, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
12. Duyunova V.A., Oglodkov M.S., Putyrskiy S.V., Kochetkov A.S., Zueva O.V. Modern technologies for melting titanium alloy ingots (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), pp. 30–40. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 02, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
13. Ewing G.W. *Instrumental methods of chemical analysis*. Moscow: Mir, 1989, 608 p.
14. Oreshnikova E.G. *Spectral analysis*. Moscow: Vyshaya shkola, 1982, 375 p.
15. Otto M. *Modern methods of analytical chemistry*. 3rd ed. Moscow: Tekhnosfera, 2008, 543 p.
16. Filichkina V.A., Skorskaya O.L., Muravyova I.V. *Methods and means of analytical testing of materials. Chemical and physical-chemical methods of analytical control: textbook*. Moscow: Publ. house MISiS, 2015, 107 p.
17. Stepanovskikh V.V., Kolpakova E.K., Khuzagaleeva R.K. Analytical control of raw materials and products in metallurgy based on the use of certified reference materials. *Analitika*, 2024, vol. 14, no. 6, pp. 488–491. DOI: 10.22184/2227-572X.2024.14.6.488.491.
18. Stepanovskikh V.V., Kolpakova E.K., Khuzagaleeva R.K. Analytical testing of ferrous metallurgy materials based on the use of certified standard samples developed by ISO JSC. *Standard samples in measurements and technologies: abstract. report VI International scientific conf. Ekaterinburg*, 2024, pp. 157–158.
19. Letov A.F. Application of instrumental methods of analysis to determine the chemical composition of new aviation materials. *I All-Rus. conf. on testing and research into the properties of materials «TestMat–2012»*: coll. report. Moscow, 2007, pp. 5–9.
20. Eroshkin S.G., Orlov G.V. Research of material inhomogeneity of reference samples made of wrought Ni-based superalloy VZH175-ID. *Trudy VIAM*, 2015, no. 8, pp. 83–87. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 02, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-11-11.
21. Eroshkin S.G., Dynin N.V., Orlov G.V., Petrov P.S. Experience in the development and production of reference materials of composition of aluminum alloy D16. *Trudy VIAM*, 2017, no. 5 (53), pp. 50–55. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 02, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-6-6.
22. Stepanovskikh V.V. Metrological traceability of the results of determining the chemical composition of metallurgical materials. Practical issues. *Analitika*, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 184–186. DOI: 10.22184/2227-572X.2024.14.2.184.186.
23. Kablov E.N., Morozov G.A., Krutikov V.N., Muravskaya N.P. Certification of standard samples of structure of complex-alloyed alloys using standard. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 2, pp. 9–11.

Информация об авторах

Ерошкин Сергей Геннадьевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Швецова Анастасия Николаевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergey G. Eroshkin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anastasia N. Shvetsova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.06.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.06.2026.

The article was submitted 17.06.2026; approved and accepted for publication after reviewing 22.06.2026.