

Научная статья

УДК 669.018, 543.423

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-74-86

**АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ТИТАНОВЫХ ОРТО-СПЛАВОВ
МЕТОДОМ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ
С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ*. Часть 2**

Р.М. Дворецков¹, Е.Б. Алексеев¹, Ф.Н. Карачевцев¹, Н.П. Бурковская¹

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

Аннотация. Предложена методика определения примесных элементов Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Sn и микродобавок Si в титановых орто-сплавах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Выбраны свободные от существенных спектральных наложений аналитические линии элементов. Оценены пределы обнаружения и определения элементов. Проведена оценка метрологических характеристик методики с использованием модельных растворов, а также правильности разработанной методики с помощью стандартных образцов.

Ключевые слова: аналитический контроль, химический анализ, титановые сплавы, интерметаллиды титана, орто-сплавы, атомно-эмиссионная спектроскопия, индуктивно связанная плазма

Для цитирования: Дворецков Р.М., Алексеев Е.Б., Карачевцев Ф.Н., Бурковская Н.П. Анализ химического состава интерметаллидных титановых орто-сплавов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Часть 2 // Труды ВИАМ. 2025. № 1 (143). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-74-86.

Scientific article

**ANALYSIS OF THE CHEMICAL COMPOSITION
OF INTERMETALLIC TITANIUM ORTHO-ALLOYS
BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA
ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY. Part 2**

R.M. Dvoretsov¹, E.B. Alekseev¹, F.N. Karachevtsev¹, N.P. Burkovskaya¹

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

Abstract. A method for determining impurity elements Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Sn and Si micro-additives in titanium ortho-alloys using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry is proposed. Analytical lines of elements free from significant spectral overlaps are selected. The limits of detection and determination of elements are assessed. The metrological characteristics of the technique are assessed using model solutions. The correctness of the developed methodology with the use of model solutions are assessed using certified reference materials.

Keywords: analytical control, chemical analysis, titanium alloys, titanium intermetallics, ortho-alloys, atomic emission spectrometry, inductively coupled plasma

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 6 (124), 2023.

For citation: Dvoretsov R.M., Alekseev E.B., Karachevtsev F.N., Burkovskaya N.P. Analysis of the chemical composition of intermetallic titanium ortho-alloys by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. Part 2. *Trudy VIAM*, 2025, no. 1 (143), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-74-86.

Введение

Данная статья является продолжением публикации по разработке методики определения массовых долей элементов, входящих в состав интерметаллидных ортосплавов с титано-алюминиево-ниобиевой матрицей методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП) [1]. В последнее время в авиакосмической индустрии первостепенными являются задачи, связанные с энергоэффективностью и энергосохранением, устойчивостью и долговечностью конструкций, со снижением массы и повышением ресурсного запаса летательных аппаратов [2, 3]. Отсюда чрезвычайная востребованность в легких, прочных и экологичных исходных материалах [4, 5].

Перспективный класс таких материалов – сплавы из алюминидов титана на основе интерметаллидных соединений систем Ti–Al (TiAl, Ti₃Al), а также Ti–Al–Nb (Ti₂AlNb) [6, 7]. Деформируемые интерметаллидные титановые сплавы на основе орторомбического интерметаллидного соединения Ti₂AlNb часто называют ортосплавами [8]. На рис. 1 показана однородная структура ортосплава ВТИ-4.

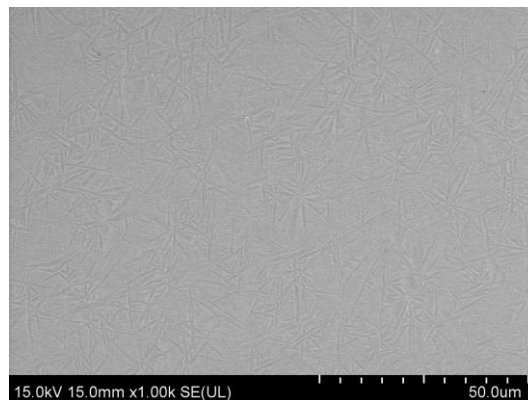


Рис. 1. Структура ортосплава ВТИ-4

Уникальность данных материалов обусловлена сочетанием их физических и эксплуатационных свойств, которое принципиально недостижимо в традиционных жаропрочных титановых сплавах или в авиационных жаропрочных никелевых сплавах [9, 10].

К матричным элементам, образующим интерметаллидное соединение – орторомбический алюминид титана Ti₂AlNb, для придания дополнительных свойств могут быть введены как легирующие элементы, такие как Mo, V, Zr, W, Ta и др., в количестве приблизительно более 1 % (по массе), а также и небольшие добавки приблизительно менее 1 % (по массе), например, Si и др. [11, 12]. Кроме того, при введении легирующих элементов и добавок в виде различных лигатур и чистых металлов, в ортосплавы могут попадать примесные элементы, в частности Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Sn и т. д., совместное присутствие которых в сплаве даже в небольшом количестве может оказывать разное влияние на свойства сплава [13].

Титановые интерметаллиды орто-типа с точки зрения освоения и внедрения являются относительно новым классом материалов, которые находятся на стадии практического применения не так давно. В связи с этим опубликованных работ по изучению

как комплексного легирования алюминидом титана Ti_2AlNb , так и влияния отдельных элементов на структурно-фазовые превращения и физико-механические свойства ортосплавов значительно меньше, чем для традиционных титановых сплавов. Поэтому влияние Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Sn, Si на свойства можно рассматривать только на примере двойных систем с титаном [14, 15]:

- хром обеспечивает в сплавах с титаном высокую прочность при хорошей пластичности, однако при дальнейших исследованиях выявился серьезный недостаток, а именно – при повышенных температурах выделение химического соединения $TiCr_2$ сопровождается потерей пластичности;

- титановые сплавы с марганцем (так же как и с хромом) могут быть термически нестабильны в некоторых условиях из-за эвтектоидного распада β -твердого раствора с выделением химического соединения эквиатомного состава;

- в нелегированном титане небольшое количество железа может вызвать локальные выделения β -фазы, что в ряде случаев снижает коррозионную стойкость, а также способствует возникновению хладноломкости при криогенных температурах;

- растворимость никеля в α -титане незначительна, а легированные никелем титановые сплавы с β -структурой довольно нестабильны – β -фаза распадается уже при температуре 250 °С, поэтому в титановых сплавах никель в качестве легирующего элемента не нашел широкого применения, кроме специальных сплавов, обладающих эффектом памяти формы (54–58 % (по массе) Ni);

- олово оказывает слабое влияние на температуру полиморфного превращения титана и относится к категории «нейтральных упрочнителей», при этом существенно повышается жаропрочность;

- медь ограниченно растворяется в β -титане (17 % (по массе)) и значительно меньше – в α -титане (2,1 % (по массе)), поэтому при закалке из α -области образуется пересыщенный медью α -твердый раствор, из которого при последующем старении выделяется химическое соединение Ti_2Cu в дисперсной форме, что сопровождается упрочнением;

- в техническом титане и конструкционных титановых сплавах, где требуется высокая ударная вязкость, кремний считается вредной примесью, так как, присутствуя даже в небольшом количестве (несколько сотых долей процента), резко снижает эту характеристику. Однако в жаропрочных титановых сплавах кремний является одной из важных микролегирующих добавок (0,15–0,35 % (по массе)) для повышения жаропрочности.

Таким образом, по аналогии с традиционными титановыми сплавами, можно констатировать, что в интерметаллидных ортосплавах содержание легирующих элементов (и их примесей), вызывающих эвтектоидный распад β -фазы и, как следствие, снижение жаропрочных свойств и ползучести, должно строго регулироваться. При этом необходимо отметить, что влияние этих элементов на интерметаллидные ортосплавы может существенно отличаться, поэтому данное научное направление является актуальным для исследований [16].

Однородность структуры и равномерное распределение химических элементов по объему слитков при производстве титановых сплавов на основе интерметаллидных соединений обеспечивают несколькими стадиями вакуумно-дугового переплава [17–20]. При этом для того, чтобы получить информацию о химическом составе слитков, необходимо проводить аналитический контроль состава на каждой стадии производства [21, 22].

Одноэлементные методики (титриметрия, фотометрия, атомная абсорбция и т. д.) определения массовой доли Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn и др. элементов в титановых сплавах подробно описаны в серии ГОСТ 19863.1–16.

Из данных табл. 1 видно, что используемая в последнее время нормативная документация не полностью учитывает расширенные актуальные интервалы содержания примесных элементов в современных титановых сплавах.

Таблица 1

**Примерный (расширенный) уровень содержания примесей
в некоторых интерметаллидных титановых орто-сплавах и диапазоны определения
примесей по действующим нормативным документам (НД) на анализ титановых сплавов**

Элемент	Массовая доля элементов, %, в сплаве и НД				
	ВТИ-4, ВИТ1 и др.	по ГОСТ 23902	по ГОСТ 19863	по ASTM E539	по ASTM E2371
Fe	0,001–1,0	0,01–2,0	0,01–5,0	0,023–2,00	0,004–3,0
Si		0,002–0,5	0,04–0,5	0,014–0,15	0,02–0,4
Mn		0,0005–2,0	0,01–2,5	0,003–9,50	0,003–0,01
Cr		0,004–3,0	0,1–12,0	0,013–4,00	0,005–4,0
Cu		0,0009–0,25	0,01–5,0	0,015–0,60	0,004–0,5
Ni		0,01–0,25	40–60	0,005–0,80	0,001–1,0
Sn		0,003–5,0	0,5–6,0	0,017–3,00	0,02–3,0

В настоящее время в аналитическом контроле титановых сплавов отечественных марок, в том числе интерметаллидных орто-сплавов, актуальной задачей является разработка современных методик анализа химического состава. При этом при разработке и производстве таких многоэлементных объектов, как интерметаллидные титановые орто-сплавы, требуются и многоэлементные методы анализа, не слишком длительные по времени, информативные, охватывающие обширные концентрационные диапазоны, обладающие высокой точностью и чувствительностью, которые легко поддаются цифровизации и автоматизации [23–25].

Большое распространение в аналитической практике получил метод атомно-эмиссионной спектроскопии (или спектрометрии) с плазменным источником возбуждения в магнитном поле [26], который обладает возможностью совместного определения большого количества элементов [27]. Для большинства металлов нижний уровень определяемых концентраций составляет 10^{-4} % (по массе), поэтому сильными сторонами этого метода являются высокие метрологические характеристики. Анализируемая проба для АЭС ИСП готовится в виде раствора на этапе пробоподготовки – это важный этап анализа, который необходимо подробно исследовать [28, 29]. Работа с растворами позволяет смоделировать состав любого сплава с помощью моноэлементных растворов ионов элементов, а также использовать такие растворы для градуировки и контроля правильности количественного анализа.

Цель данной работы – разработка методического подхода для определения массовой доли Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn в титановых орто-сплавах методом АЭС ИСП, который включает:

- исследование способов пробоподготовки сплавов (в том числе выбор массы навески, кислот, объема реагентов, продолжительности растворения в микроволновой системе);
- исследование спектральных интерференций и выбор наиболее пригодных для детектирования аналитического сигнала линий;
- оценку метрологических характеристик (предел обнаружения, предел определения, показатель повторяемости) с использованием модельных составов;
- использование стандартных образцов и/или образцов сравнения для контроля правильности анализа.

Работа проведена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [30].

Материалы и методы

Определение массовой доли элементов выполняли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой в режиме аксиального обзора плазмы. Использовали следующие рабочие параметры: мощность плазмы 1,2 кВт; расход плазмообразующего потока газа 12 л/мин; расход газа, подаваемого на распылитель, 0,7 л/мин. Применяли газ аргон марки ВЧ чистотой 99,998 % (объемн.).

Для исследования спектральных интерференций и определения метрологических показателей предложенной методики использовали растворы, моделирующие составы реальных орто-сплавов. Для приготовления моделей использовали государственные стандартные образцы растворов-моноэлементов.

При выборе необходимой массы навески и разбавления учитывали содержание определяемых элементов, линейный диапазон спектрометра и интенсивность выбранных аналитических линий. Взвешивание проб проводили на прецизионных весах HR-200.

Растворение навесок проводили в герметично закрытых автоклавах в микроволновой системе разложения в смеси разбавленных бидистиллированной водой кислот HCl, HNO₃ и HF.

Для проверки правильности разработанной методики использовали стандартные образцы предприятия (СОП) титановых сплавов, разработанные в ВИАМ.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

В части 1 данной статьи исследовали зависимость степени извлечения элементов из пробы орто-сплава ВТИ-4 от состава кислотной смеси при растворении в системе микроволнового разложения. Исходя из полученных данных, для растворения навески 0,2 г использовали смесь состава 5 мл H₂O + 5 мл HCl + 1 мл HNO₃ + 1 мл HF при определении основных элементов. Для определения примесей Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn в пробах от экспериментальных слитков орто-сплавов и стандартных образцов титановых сплавов использовали такое же растворение для навески 0,2 г либо в случае предельно низких содержаний примесей брали навеску 0,4 г и осуществляли растворение в смеси состава 10 мл HCl + 1,5 мл HNO₃ + 1,5 мл HF.

Из-за интерференционных наложений спектральных линий, находящихся близко друг от друга, интенсивность фона или характеристического излучения элементов может завышаться или занижаться, внося существенную погрешность в результаты анализа. Поэтому для данной системы Ti–Al–Nb при определении примесей Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn необходимо исследовать спектральное влияние элементов основы и легирующих элементов на примесные элементы.

Для исследования интерференций на предварительно выбранных длинах волн λ (отсеяны очевидные случаи спектральных наложений) исследуемых элементов последовательно проводили измерения интенсивности по следующим растворам:

– раствор холостого опыта (X), содержащий на 100 мл бидистиллированной воды 5 мл HCl + 1 мл HNO₃ + 1 мл HF;

– растворы аналитов (A), содержащие только один определяемый элемент с соответствующей концентрацией: Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn – по 1 мкг/мл;

– растворы интерферентов (И), содержащие основные и легирующие элементы с максимальными концентрациями, мкг/мл: 1000 Ti; 1000 Nb; 200 Al; Mo, V, Zr, Ta, W – по 50.

Таким образом, в данном эксперименте для градуировки использовали растворы А, для оценки спектральных наложений – растворы И. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты исследования интерференционных наложений вблизи некоторых спектральных линий определяемых элементов

Аналит (длина волны λ_A , нм)	Ближайший интерферент (длина волны λ_I , нм)	Интенсивность аналитического сигнала на длинах волн аналитов, имп/с, в растворе			Предел обнаружения, C_{min} , мкг/мл	«Мнимая» концентрация аналита в растворе И, мкг/мл
		Х	А	И		
Cr (267,716)	W (267,715)	127	7 736	2 241	0,003	<0,001
Cr (276,653)	V (276,646)	159	9 512	1 671	0,004	<0,001
Cr (313,205)	ОН (313,218)	326	7 905	40 089	0,008	5
Cu (219,227)	Ni (219,234)	21	1 284	177	0,017	<0,001
Cu (223,009)	Ti (223,022)	17	1 201	162	0,017	<0,001
Cu (324,754)	Nb (324,747)	249	24 241	86 367	0,001	4
Fe (238,204)	Cr (238,219)	703	9 048	1 917	0,008	<0,001
Fe (240,489)	Ta (240,480)	440	5 538	1 115	0,011	<0,001
Fe (258,588)	Mo (258,589)	174	2 198	2 767	0,013	1
Mn (257,610)	Nb (257,597)	106	77 881	2 040	0,001	<0,001
Mn (293,931)	Ta (293,925)	39	14 096	392	0,003	<0,001
Mn (261,815)	Fe (261,802)	13	887	2 564	0,024	3
Ni (216,555)	W (216,555)	34	1 660	234	0,017	<0,001
Ni (231,096)	Fe (231,129)	20	674	116	0,040	<0,001
Ni (227,021)	Nb (227,018)	54	1 876	15 353	0,017	8
Si (221,667)	Ni (221,648)	19	99	23	0,12	<0,001
Si (252,411)	V (252,396)	58	690	21	0,046	<0,001
Si (251,432)	Nb (251,435)	40	430	7 752	0,075	20
Sn (189,925)	Ti (189,939)	13	85	29	0,11	<0,001
Sn (283,998)	Cr (284,001)	30	1 220	289	0,021	<0,001
Sn (226,893)	Ti (226,908)	11	113	7 111	0,26	78

Если в растворах с интерферентами фиксировали концентрацию аналита, превышающую более чем в 2 раза предел обнаружения элемента, то делали вывод, что интерференционные наложения могут вносить существенный вклад в погрешность результатов анализа. Предел обнаружения C_{min} рассчитывали как три стандартных квадратических отклонения десяти параллельных измерений раствора холостого опыта.

Для иллюстрации полученных данных из табл. 2 на рис. 2 представлен вид некоторых спектров вблизи исследуемых линий Cr (а), Cu (б), Fe (в), Mn (г), Ni (д), Si (е), Sn (ж).

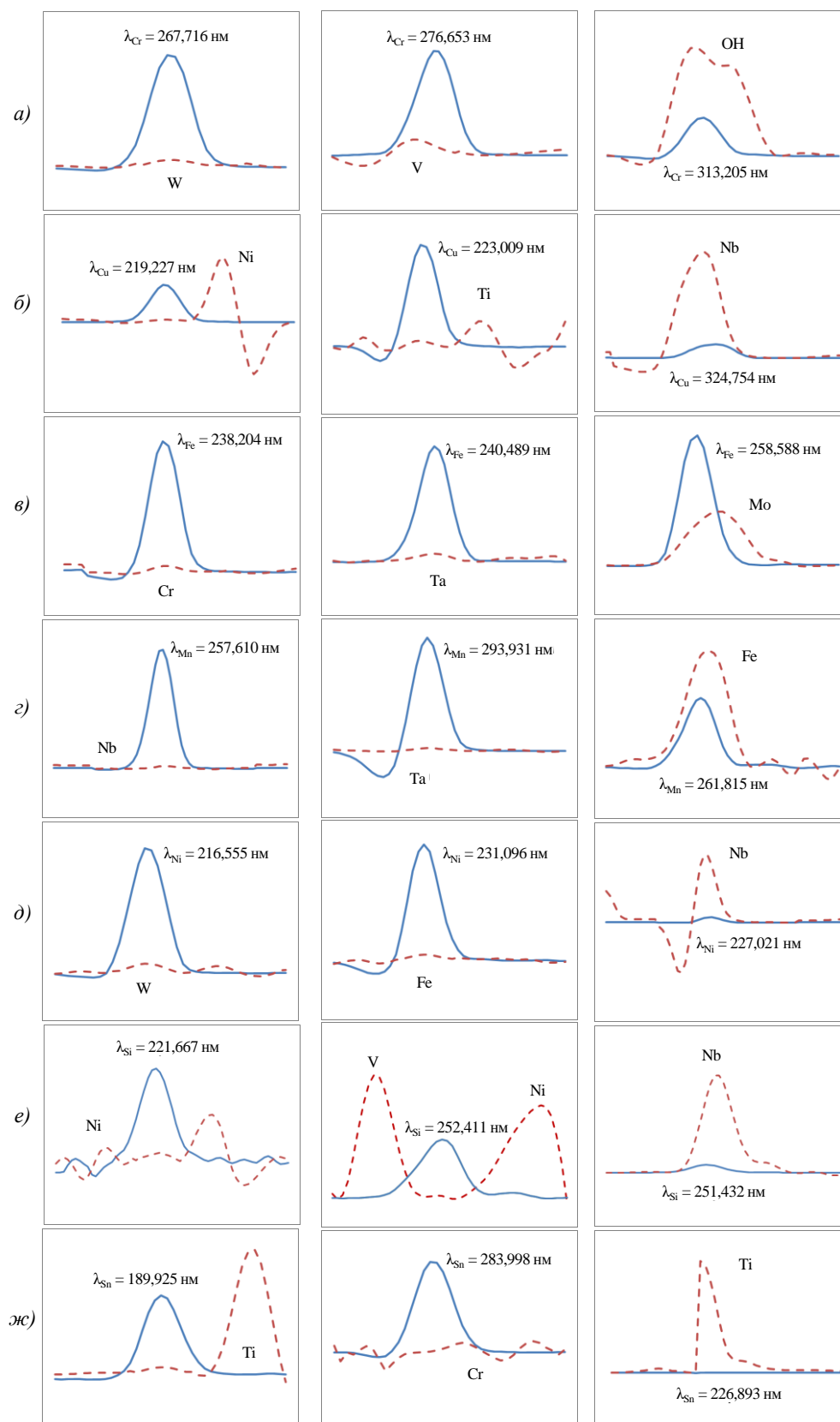


Рис. 2. Спектры растворов для аналитов А (—) и для интерферентов И (- - -) (λ – длина волны)

Исходя из полученных интенсивностей (табл. 2) и вида спектров вблизи спектральных линий аналитов (рис. 2), выбраны свободные от существенных интерференций

аналитические линии, пригодные для количественного определения Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn в титановых орто-сплавах (табл. 3). Предел определения C_{lim} рассчитывали как три стандартных квадратических отклонения десяти параллельных измерений раствора интерферентов (И), содержащего только основные и легирующие элементы орто-сплавов с концентрациями, близкими к максимальным.

Таблица 3

Результаты выбора спектральных линий, свободных от значимых интерференционных наложений, и пределы определения элементов

Элемент	Аналитическая линия, нм	Предел определения, C_{lim} , мкг/мл	Альтернативная линия, нм	Предел определения, C_{lim} , мкг/мл
Cr	267,716	0,003	276,653	0,003
Cu	219,227	0,018	223,009	0,023
Fe	238,204	0,004	240,489	0,010
Mn	257,610	0,001	293,931	0,003
Ni	216,555	0,019	231,604	0,020
Si	221,667	0,15	252,411	0,078
Sn	189,925	0,12	283,998	0,022

Для набора статистики и оценки метрологических показателей по рекомендации межгосударственной стандартизации РМГ 61-2010 «Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки» использовали образцы сравнения, смоделированные в виде растворов, опорные значения которых с небольшим шагом находятся в диапазоне массовых долей этой методики с учетом расширенных интервалов содержания элементов для изучения химического состава, в том числе экспериментальных орто-сплавов.

Исходная концентрация модельных растворов 2 г/дм³. От каждого исходного модельного раствора отбирали три серии по семь аликвотных частей, разбавляли в 20 раз и проводили совместное определение массовой доли элементов Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn, повторив эксперимент 2 раза со сменой оператора анализа. По результатам измерений рассчитывали показатели: повторяемости, внутрилабораторной прецизионности, точности (табл. 4).

Таблица 4

Метрологические характеристики, рассчитанные по модельным растворам

Элемент	Диапазон содержания, % (по массе)	Показатель точности, $\pm\delta$, % отн., ($P = 0,95$)	Показатель повторяемости, $S_{r,m}$, % отн.	Показатель внутрилабораторной прецизионности, S_i , % отн.
Cr	0,001–0,01	11	4	5
	0,01–0,1	7	3	4
	0,1–1	3	1	2
Cu	0,001–0,01	10	4	5
	0,01–0,1	6	3	4
	0,1–1	3	1	2
Fe	0,001–0,01	14	4	5
	0,01–0,1	5	3	4
	0,1–1	4	1	2
Mn	0,001–0,01	10	4	5
	0,01–0,1	5	3	4
	0,1–1	3	1	2
Ni	0,001–0,01	12	4	5
	0,01–0,1	7	3	4
	0,1–1	2	1	2
Si	0,001–0,01	19	6	7
	0,01–0,1	8	3	4
	0,1–1	4	1	2
Sn	0,001–0,01	16	6	7
	0,01–0,1	7	3	4
	0,1–1	4	1	2

Для того чтобы установить нижние границы определяемых содержаний методики для легирующих элементов Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn, проведена оценка пределов определения элементов C_{lim} , который рассчитывали как три стандартных квадратичных отклонения десяти измерений раствора Ti (2 г/л).

Для совместного определения элементов в зависимости от уровня содержаний выбраны объем аликвотных частей и разбавление (табл. 5).

Таблица 5

Диапазоны определяемых содержаний, объем аликвотных частей и колб

Определяемый элемент	Диапазоны определяемых содержаний, % (по массе)	
Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn	От 0,001 до 0,1 включительно	>0,1
Аликвотная часть раствора, мл	20	2,5
Вместимость колбы, мл	25	50
Разбавление, раз	1,25	20

На завершающем этапе разработки для подтверждения правильности разработанной методики при определении Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn использовали стандартные образцы категории СОП, используемые в ВИАМ, для сплавов ВТИ-4 и ВТ6. Аттестованные значения элементов СОП и результаты, полученные методом АЭС ИСП, представлены в табл. 6.

Таблица 6

Аттестованные значения и погрешности стандартных образцов предприятия (СОП) из титановых сплавов и результаты определения методом АЭС ИСП элементов с доверительным интервалом (при $n = 4$ и $P = 0,95$)*

Наименование СОП	Содержание элементов, % (по массе)						
	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Si	Sn
ВТИ-4	0,0089	0,0115	0,370	0,0091	0,0340	0,240	0,0180
	0,003	0,005	0,04	0,002	0,008	0,02	0,004
	0,0098	0,0117	0,364	0,0089	0,0343	0,230	0,0167
	0,001	0,003	0,01	0,001	0,005	0,02	0,003
ВТ6	0,0282	0,0176	0,130	0,0022	0,0247	0,0745	0,0083
	0,003	0,002	0,01	0,0005	0,004	0,007	0,001
	0,0291	0,0166	0,137	0,0023	0,0253	0,0732	0,0081
	0,002	0,001	0,01	0,0003	0,003	0,005	0,001

* Нижняя строка – результаты АЭС ИСП ($\pm\Delta$).

Видно, что между результатами анализа и аттестованными значениями СОП отсутствуют значимые расхождения (правильность полученных результатов оценивали по критерию Стьюдента при $P = 0,95$ и $n = 4$).

Заключения

Таким образом, разработана методика определения примесных элементов Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn в титановых орто-сплавах методом АЭС ИСП. Экспериментально подобраны аналитические линии для определения Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn. Проведены исследования метрологических характеристик методики с использованием модельных растворов:

– для содержания элементов >0,001 % (по массе) показатель повторяемости и показатель промежуточной прецизионности не превышают 5 % отн., показатель точности: 20 % отн.;

– для содержания элементов $>0,1$ % (по массе) показатель повторяемости и показатель промежуточной прецизионности не превышают 4 % отн., показатель точности: 8 % отн.

Разработанная методика определения примесных элементов Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn в титановых орто-сплавах методом АЭС ИСП может применяться также для определения состава современных титановых сплавов типа ВТИ и ВИТ. Разработанный методический подход способствует изучению влияния разных содержаний примесных элементов Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Sn, Si (как по отдельности, так и в сумме) на комплексно-легированные орто-сплавы.

Список источников

1. Дворецков Р.М., Алексеев Е.Б., Карачевцев Ф.Н., Загвоздкина Т.Н. Анализ химического состава интерметаллидных титановых орто-сплавов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Часть 1 // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-115-129.
2. Анташев В.Г., Ночовная Н.А., Падюкова Н.М., Павлова Т.В. Анализ потребности науки и техники в высокоресурсных жаропрочных титановых сплавах и эрозионных жаростойких покрытиях // Авиационные материалы и технологии. 2002. № 2. С. 32–45.
3. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
5. Макушина М.А., Кочетков А.С., Ночовная Н.А. Литейные титановые сплавы для авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-39-47.
6. Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В., Конева Н.А. и др. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением. М.: МИСиС, 2008. 328 с.
7. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.
8. Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Лукина Е.А., Новак А.В. Структура и свойства листовых полуфабрикатов из деформируемых интерметаллидных титановых сплавов разных классов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 17–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-17-25.
9. Алексеев И.Е., Пилипенко А.А., Варфоломеев М.С. Возможность замены никелевых жаропрочных сплавов на сплавы на основе интерметаллида Ti-Al // Быстрозакаленные материалы и покрытия: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. М., 2022. С. 311–315.
10. Скворцова С.В., Умарова О.З., Анищук Д.С., Смирнов В.Г. Формирование структуры, фазового состава и механических свойств сплава на основе алюминиды титана Ti_2AlNb при термической обработке // Титан. 2015. № 3 (49). С. 29–33.
11. Польшкин И.С., Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В. Легирование, фазовый состав и механические свойства титановых сплавов // Технология легких сплавов. 2022. № 2. С. 4–13.
12. Новак А.В. Закономерности влияния микродобавок редкоземельных элементов на структурно-фазовое состояние и механические характеристики интерметаллидного сплава на основе орторомбического алюминиды титана: дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 128 с.
13. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti-Al-Sn-Zr-Si-β-стабилизаторы // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
14. Борисова Е.А., Бочвар Г.А., Брун М.Я. и др. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. М. Металлургия, 1980. 464 с.

15. Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Новак А.В. Закономерности формирования структурно-фазового состояния сплавов на основе орто- и гамма-алюминидов титана в процессе термомеханической обработки // Вестник РФФИ. 2015. № 1. С. 18–26.
16. Подкопалов И.А. Обзор сплавов на основе интерметаллидов титана // Мавлютовские чтения: материалы XV Всерос. молодежной науч. конф.: в 7 т. Уфа, 2021. Т. 2. С. 311–315.
17. Абраимов Н.В., Петухов И.Г., Зарыпов М.С., Лукина В.В. К вопросу о жаростойкости титановых сплавов, работающих при температурах выше 650 °С // Электрометаллургия. 2021. № 12. С. 10–20.
18. Сковрцова С.В., Умарова О.З., Агаркова Е.О., Чернышова А.А. Влияние термической обработки на структуру и механические свойства плиты из интерметаллидного сплава ВТИ-4 // Титан. 2015. № 4 (50). С. 17–21.
19. 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). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 27.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
20. Шубин И.Ю., Никитин Я.Ю., Пучков Ю.А., Алексеев Е.Б., Давыдова Е.А. Исследование стойкости к высокотемпературной газовой и солевой коррозии жаропрочного интерметаллидного титанового сплава ВТИ-4 // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2020. № 6 (135). С. 83–105.
21. Барановская В.Б., Медведевских М.Ю., Карпов Ю.А. Актуальные проблемы качества химического анализа // Аналитика и контроль. 2021. Т. 25. № 4. С. 273–279.
22. Карпов Ю.А., Барановская В.Б. Аналитический контроль – неотъемлемая часть диагностики материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1-1. С. 5–12.
23. Надеждина М.Е. Цифровизация – глобальные тренды и основные вызовы // Сб. тр. конф. «Современные цифровые технологии: проблемы, решения, перспективы». Казань, 2022. С. 40–43.
24. Надеждина М.Е., Шинкевич А.И. Сквозная цифровая технология больших данных в основе цифровой трансформации производственной системы предприятия // Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий: сб. ст. Всерос. науч.-практич. конф. Курск, 2022. С. 201–204.
25. Васипов В.В., Евсюков А.И. Социальные сети как инструмент популяризации химической науки // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тез. докл.: в 5 т. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. Т. 5. С. 79.
26. Отто М. Современные методы аналитической химии: в 2 т. М.: Техносфера, 2003. Т. I. 416 с.
27. Карпов Ю.А., Барановская В.Б. Роль и возможности аналитического контроля в металлургии // Цветные металлы. 2016. № 8 (884). С. 63–67. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.09.
28. Вячеславов А.В., Малинкина Ю.Ю., Бичаев В.Б. и др. Анализ коррозионно-стойких титановых сплавов, легированных рутением, методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 5. С. 14–19.
29. 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.
30. 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.

References

1. Dvoretzky R.M., Alekseev E.B., Karachevtsev F.N., Zagvozdina T.N. Analysis of the chemical composition of intermetallic titanium ortho-alloys by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. Part 1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-115-129.

2. Antashev V.G., Nochovnaya N.A., Padyukova N.M., Pavlova T.V. Analysis of the need of science and technology for high-resource heat-resistant titanium alloys and erosion heat-resistant coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2002, no. 2, pp. 32–45.
3. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 5, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-186-194.
4. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 520–530.
5. Makushina M.A., Kochetkov A.S., Nochovnaya N.A. Cast titanium alloys for aviation equipment (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-39-47.
6. Kolobov Yu.R., Kablov E.N., Kozlov E.V., Koneva N.A. et al. *Structure and properties of intermetallic materials with nanophase strengthening*. Moscow: MISIS, 2008, 328 p.
7. Nochovnaya N.A., Bazyleva O.A., Kablov D.E., Panin P.V. *Intermetallic alloys based on titanium and nickel*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 308 p.
8. Dzunovich D.A., Alekseyev E.B., Panin P.V., Lukina E.A., Novak A.V. Structure and properties of sheet semi-finished products from various wrought intermetallic titanium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 17–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-17-25.
9. Alekseev I.E., Pilipenko A.A., Varfolomeev M.S. Possibility of replacing nickel heat-resistant alloys with alloys based on the intermetallic compound Ti–Al. *Rapidly quenched materials and coatings: proc. XIX Int. sci.-tech. conf. Moscow, 2022*, pp. 311–315.
10. Skvortsova S.V., Umarova O.Z., Anishchuk D.S., Smirnov V.G. Formation of the structure, phase composition and mechanical properties of an alloy based on titanium aluminide Ti₂AlNb during heat treatment. *Titan*, 2015, no. 3 (49), pp. 29–33.
11. Polkin I.S., Egorova Yu.B., Davydenko L.V. Alloying, phase composition and mechanical properties of titanium alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2022, no. 2, pp. 4–13.
12. Novak A.V. *Regularities of the influence of microadditives of rare earth elements on the structural-phase state and mechanical characteristics of an intermetallic alloy based on orthorhombic titanium aluminide*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2019, 128 p.
13. Kablov E.N., Kashapov O.S., Medvedev P.N., Pavlova T.V. Study of a $\alpha + \beta$ -titanium alloy based on a system of Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
14. Borisova E.A., Bochvar G.A., Brun M.Ya. et al. *Titanium alloys. Metallography of titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 464 p.
15. Nochovnaya N.A., Panin P.V., Alekseev E.B., Novak A.V. Regularities of formation of structural-phase state of alloys based on titanium ortho- and gamma-aluminides during thermomechanical treatment. *Vestnik RFFI*, 2015, no. 1, pp. 18–26.
16. Podkopalov I.A. Review of alloys based on titanium intermetallic compounds. *Mavlyutov readings: materials of the XV All-Russian youth scientific conf.:* in 7 vols. Ufa, 2021, vol. 2, pp. 311–315.
17. Abraimov N.V., Petukhov I.G., Zarypov M.S., Lukina V.V. On the issue of heat resistance of titanium alloys operating at temperatures above 650 °C. *Electrometallurgiya*, 2021, no. 12, pp. 10–20.
18. Skvortsova S.V., Umarova O.Z., Agarkova E.O., Chernyshova A.A. Effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of an intermetallic alloy plate VTI-4. *Titan*, 2015, no. 4 (50), pp. 17–21.
19. 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), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 27, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
20. Shubin I.Yu., Nikitin Ya.Yu., Puchkov Yu.A., Alekseev E.B., Davydova E.A. Study of resistance to high-temperature gas and salt corrosion of heat-resistant intermetallic titanium alloy VTI-4. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroyeniye*, 2020, no. 6 (135), pp. 83–105.

21. Baranovskaya V.B., Medvedevskikh M.Yu., Karpov Yu.A. Actual problems of the quality of chemical analysis. *Analitika i kontrol*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 273–279.
22. Karpov Yu.A., Baranovskaya V.B. Analytical control is an integral part of materials diagnostics. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 1-I, pp. 5–12.
23. Nadezhdina M.E. Digitalization – global trends and main challenges. *Reports «Modern digital technologies: problems, solutions, prospects»*. Kazan, 2022, pp. 40–43.
24. Nadezhdina M.E., Shinkevich A.I. End-to-end digital technology of big data as the basis of digital transformation of the enterprise production system. *Current trends in the digital transformation of industrial enterprises: Reports All-Rus. scientific and practical conf. Kursk, 2022*, pp. 201–204.
25. Vasipov V.V., Evsyukov A.I. Social networks as a tool for popularizing chemical science. *XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: reports: in 5 vols. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016*, vol. 5, p. 79.
26. Otto M. *Modern methods of analytical chemistry: in 2 vols. Moscow: Tekhnosfera, 2003*, vol. I, 416 p.
27. Karpov Yu.A., Baranovskaya V.B. The role and possibilities of analytical control in metallurgy. *Tsvetnye metally*, 2016, no. 8 (884), pp. 63–67. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.09.
28. Vyacheslavov A.V., Malinkina Yu.Yu., Bichayev V.B. et al. Analysis of corrosion-resistant titanium alloys alloyed with ruthenium by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2018, vol. 84, no. 5, pp. 14–19.
29. Karpov Yu.A., Baranovskaya V.B. Problems of standardization of chemical analysis methods in metallurgy. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2019, vol. 85, no. 1–2, pp. 5–14.
30. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

Дворецков Роман Михайлович, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Алексеев Евгений Борисович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Карачевцев Федор Николаевич, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бурковская Наталия Петровна, научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Roman M. Dvoretsov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeny B. Alekseev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Fedor N. Karachevtsev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nataliya P. Burkovskaya, Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.08.2024.
The article was submitted 24.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 06.08.2024.