

Научная статья

УДК 669.018, 543.423

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-115-129

**АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ТИТАНОВЫХ ОРТО-СПЛАВОВ МЕТОДОМ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ. Часть 1***Р.М. Дворецков<sup>1</sup>, Е.Б. Алексеев<sup>1</sup>, Ф.Н. Карачевцев<sup>1</sup>, Т.Н. Загвоздкина<sup>1</sup>*

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

**Аннотация.** Предложена методика определения элементов основы Ti, Nb, Al и легирующих элементов Mo, V, Zr, W, Ta в титановых орто-сплавах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Выбраны свободные от существенных спектральных наложений аналитические линии элементов, а также спектральные линии внутреннего стандарта. Оценены пределы обнаружения 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., 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-115-129.

Scientific article

**ANALYSIS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF INTERMETALLIC TITANIUM ORTHO-ALLOYS BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY. Part 1***R.M. Dvoretsov<sup>1</sup>, E.B. Alekseev<sup>1</sup>, F.N. Karachevtsev<sup>1</sup>, T.N. Zagvozdina<sup>1</sup>*

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

**Abstract.** A technique is proposed for determining the base elements Ti, Nb, Al and alloying elements Mo, V, Zr, W, Ta in ortho-titanium alloys by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. Analytical lines of elements free from significant spectral overlaps are chosen. The spectral lines of the internal standard were selected. The limits of detection of elements are estimated. The metrological characteristics of the technique were evaluated using model solutions. The correctness of the developed methodology was assessed using standard samples.

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

**For citation:** Dvoretsov 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-115-129.

**Введение**

В последнее время в авиационной отрасли большое внимание уделяется вопросам энергосбережения и надежности, сокращения вредных выбросов в окружающую среду, снижения массы и увеличения ресурса работы двигателей [1, 2]. Поэтому для удовлетворения потребностей авиационной отрасли постоянно увеличивается спрос на легкие, прочные и экологичные материалы [3]. Одним из наиболее перспективных направлений в разработке подобных материалов являются алюминиды титана на основе интерметаллидных соединений систем Ti–Al (TiAl и Ti<sub>3</sub>Al), а также Ti–Al–Nb (Ti<sub>2</sub>AlNb) [4, 5]. Уникальность данных материалов обусловлена сочетанием их физических и эксплуатационных свойств, которое принципиально недостижимо в традиционных жаропрочных титановых сплавах или в авиационных никелевых жаропрочных сплавах [6].

Алуниниды титана обладают высокими удельными характеристиками, а также повышенным сопротивлением окислению за счет формирования на их поверхности сплошной оксидной пленки, состоящей из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> или AlNbO<sub>4</sub>, которая препятствует диффузии кислорода [7, 8].

В настоящее время в авиационной промышленности уже нашли применение сплавы на основе интерметаллида TiAl (гамма-сплавы). Основными преимуществами таких интерметаллидных сплавов являются низкая плотность, высокие жаропрочность и жаростойкость [9]. Однако гамма-сплавы системы Ti–Al не лишены недостатков, им свойственны низкие пластичность и технологичность при обработке давлением [10].

В свою очередь, разработаны и на данном этапе находятся на стадии промышленного внедрения деформируемые интерметаллидные титановые сплавы на основе орторомбического интерметаллида Ti<sub>2</sub>AlNb (орто-сплавы), которые обладают более высоким комплексом механических, конструкционных и эксплуатационных свойств по сравнению со сплавами на основе соединений Ti<sub>3</sub>Al и TiAl [11–13].

Интерметаллид Ti<sub>2</sub>AlNb и сплавы на его основе имеют более высокую температуру плавления, лучшую теплопроводность, наиболее низкий коэффициент линейного термического расширения, а также большую прочность и, что очень важно, повышенные пластические и технологические свойства, по сравнению с алюминидами Ti<sub>3</sub>Al, TiAl и сплавами на их основе [14].

В сплав к матричным элементам, образующим интерметаллидное соединение орторомбического алюминида титана Ti<sub>2</sub>AlNb, могут быть введены добавки таких элементов, как Mo, V, Zr, W, Ta и др. [15].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ уже разработаны сплавы марок ВТИ-4, ВИТ1, ВИТ5, ВИТ6 на основе системы Ti–Al–Nb и исследования в данной области продолжаются. Из орто-сплавов изготавливают большой сортамент деформируемых полуфабрикатов (крупные штамповки, заготовки лопаток, листы, ленту и фольгу) с обширным диапазоном механических свойств [16]. Сплавы серии ВТИ и ВИТ рекомендованы разработчиками для изготовления таких деталей, как сопловые лопатки, корпусные и статорные детали авиадвигателей, облегченные панели и модули аэрокосмических конструкций с рабочей температурой до 650–700 °С [17].

Выплавку интерметаллидных титановых сплавов типа ВТИ и ВИТ осуществляют как минимум тройным вакуумно-дуговым переплавом [18]. Проведение многократных вакуумно-дуговых переплавов направлено на растворение тугоплавких легирующих элементов и формирование однородного химического состава и структуры по всему объему слитков. От выбранных режимов выплавки слитков во многом зависит конечное качество готовых полуфабрикатов и деталей изделий. Поэтому перед технологами стоит очень серьезная задача по обеспечению растворения тугоплавких элементов, однородному перемешиванию всех легирующих элементов, достижению точного состава в необходимом диапазоне концентраций и формированию мелкозернистой структуры на последнем переплаве, поскольку все эти факторы оказывают существенное влияние на

качество слитков и механические свойства полуфабрикатов, изготовленных из них. В случае неправильно выбранных параметров выплавки или исходных лигатур в слитках могут оставаться нерастворившиеся включения тугоплавких элементов (рис. 1, *а*), зоны химической неоднородности в макрообъемах (рис. 1, *б*) и ликвационные неоднородности, приводящие в конечном полуфабрикате/изделии к неравномерному выпадению фаз (рис. 1, *в, г*). В то время как химическая и структурная неоднородность может приводить к значительному разбросу свойств заготовок, а значит и к снижению ресурса деталей, наличие тугоплавких включений вовсе недопустимо по причине того, что может привести к разрушению деталей в процессе эксплуатации.

Таким образом, качественно выплавленный слиток и многостадийный контроль химического состава являются залогом успешной работы детали.

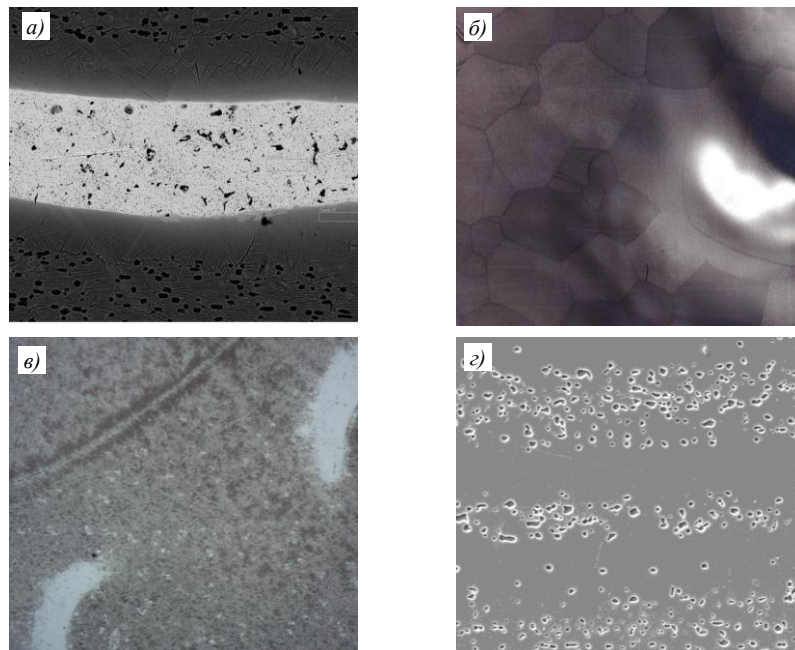


Рис. 1. Возможные дефекты слитков (*а–в*) и полуфабрикатов (*г*) из интерметаллидных титановых сплавов в случае неправильно подобранных режимов выплавки: *а* – не растворившееся тугоплавкое включение чистого ниобия; *б* – химическая неоднородность; *в, г* – зоны неравномерного выделения фаз в результате локальной ликвационной неоднородности (*а, г* – растровая электронная микроскопия; *б, в* – оптическая микроскопия)

Для того чтобы обеспечить своевременное получение информации о химическом составе сплавов в процессе разработки и производства необходим аналитический контроль [19]. Аналитический контроль – неотъемлемая часть диагностики материалов [20]. Для контроля химического состава на каждой стадии технологического процесса изготовления сплавов из интерметаллидов титана необходимы доступные многоэлементные методики, позволяющие определять элементы основы, легирующие добавки и примесные элементы [21].

Ранее для определения массовой доли титана, алюминия, ниобия, молибдена, ванадия, циркония и др. элементов титановых сплавов использовали методики, подробно описанные в серии ГОСТ 19863.1–16 с применением таких методов анализа, как титриметрия, комплексонометрия, фотометрия, гравиметрия и атомная абсорбция. Все перечисленные в ГОСТ 19863 методики позволяют проводить определение только одного соответствующего элемента, поэтому такой анализ является длительным по времени, а также трудоемким. Кроме того, применимы эти методики для узких интервалов массовых долей элементов (табл. 1).

**Примерный химический состав некоторых интерметаллидных титановых орто-сплавов и диапазоны содержания элементов по действующим нормативным документам (НД) на анализ титановых сплавов [22–24]**

Элемент	Массовая доля элементов, %, в сплаве и НД				
	ВТИ-4	ВИТ1	по ГОСТ 23902	по ГОСТ 19863	по ASTM E2371
Ti	Основа	Основа	–	40–50	–
Nb	40	40	–	0,1–5	0,008–0,1
Al	12	11	0,004–8	0,1–10	0,009–8
Mo	1	1,5	0,006–10	0,01–15; 28–36	0,004–6,0
V	1	–	0,002–6	0,1–6	0,01–15,0
Zr	1	1,5	0,006–10	0,02–20	0,003–4,0
Ta	–	1,5	–	–	0,01–0,1
W	–	1,5	–	0,1–6	0,01–0,1

Для быстрого совместного определения массовых долей групп элементов в исследуемом металлургическом объекте часто применяют методы анализа, основанные на детектировании излучения на характеристических спектральных линиях элементов.

Например, ГОСТ 23902 устанавливает требования к методам спектрального анализа с дуговым или искровым источником возбуждения спектральных линий в твердых металлических образцах, в том числе для определения Al, Mo, V, Zr и других элементов в деформируемых и литейных титановых сплавах. Однако модели спектрометров, используемые в этом нормативном документе, устарели и давно сняты с производства. Кроме того, появились новые системы легирования, в том числе сплавы на основе интерметаллических соединений титана. В настоящее время отсутствуют твердотельные стандартные образцы, необходимые для искрового оптико-эмиссионного анализа и рентгенофлуоресцентного анализа химического состава современных марок титановых интерметаллидов.

Среди зарубежных нормативных документов можно выделить ASTM E2371, который регламентирует применение атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП) для определения массовых долей содержания элементов в титановых сплавах зарубежных марок. Другая методика АЭС ИСП анализа титановых сплавов описана в работе [25].

Из данных табл. 1 видно, что используемые в данное время НД не учитывают изменения интервалов содержания элементов в современных титановых сплавах.

Таким образом, на данном этапе 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 и автоматизированные, охватывающие обширные концентрационные диапазоны и обладающие высокими точностью и чувствительностью [26].

Большое распространение в аналитической практике получил метод атомно-эмиссионной спектроскопии (или спектрометрии) с плазменным источником возбуждения в магнитном поле [27], который обладает возможностью совместного определения большого количества элементов. 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. 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 [28].

Цель данной работы – разработка методического подхода для определения массовой доли Ti, Nb, Al, Mo, V, Zr, Ta, W в титановых орто-сплавах методом АЭС ИСП, который включает [29]:

- исследование спектральных интерференций и выбор наиболее пригодных для детектирования аналитического сигнала линий;
- выбор элемента для внутреннего стандарта;
- оценку метрологических характеристик (предел определения, показатель повторяемости) с использованием модельных составов;
- сравнение аксиального и радиального режимов обзора плазмы при определении основных элементов;
- исследование способов пробоподготовки сплавов (в том числе выбор массы навески, выбор кислот, объем реагентов, продолжительность растворения в микроволновой системе);
- использование стандартных образцов и 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 спектрометре Agilent 5100 в режиме аксиального и радиального (в случае титана) обзора плазмы. С учетом рекомендаций производителя прибора, использованы 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. В экспериментах с растворением использовали навески 0,2 и 0,4 г.

В целях одновременного определения Ti, Nb, Al, Mo, V, Zr, Ta, W для растворения проб титановых сплавов выбрана смесь разбавленной бидистиллированной водой кислот HCl, HNO<sub>3</sub> и HF, в которых растворяются перечисленные металлы. Растворение навесок проводили в герметично закрытых автоклавах в микроволновой системе разложения.

В виду отсутствия стандартных образцов орто-сплавов для проверки правильности разработанной методики использовали архивные стандартные образцы титановых сплавов, ранее разработанные в ВИАМ и ВИЛС.

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

### Результаты и обсуждение

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 и легирующих элементов Mo, V, Zr, Ta, W необходимо исследовать спектральное влияние элементов друг на друга.

Для исследования интерференций на предварительно выбранных длинах волн  $\lambda$  исследуемых элементов последовательно проводили измерения интенсивности по следующим растворам:

– раствор холостого опыта (X), содержащий на 100 мл бидистиллированной воды 0,15 мл HCl + 0,05 мл HNO<sub>3</sub> + 0,05 мл HF;

– растворы аналитов (А), содержащие только один определяемый элемент с соответствующей концентрацией, мкг/мл: Ti, Nb – по 30, 5Al, Mo V, Zr, Ta, W – по 1;

– растворы интерферентов (И), содержащие все элементы, кроме аналита, с максимальными концентрациями, мкг/мл: 60Ti; 60Nb; 20Al; Mo, V, Zr, Ta, W – по 10 мкг/мл.

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

Таблица 2

**Результаты исследования интерференционных наложений  
вблизи некоторых спектральных линий определяемых элементов**

Аналит (длина волны $\lambda_A$ ), нм	Ближайший ин- терферент (дли- на волны $\lambda_I$ ), нм	Интенсивность аналитического сигнала на длинах волн аналитов, имп/с, в растворе			Предел обнаруже- ния $C_{min}$ , мкг/мл	«Мнимая»* концентрация аналита в рас- творе И, мкг/мл
		X	A	И		
Al (226,910)	Ti (226,908)	23	2514	14034	0,006	<b>8,1</b>
Al (257,509)	–	23	2913	21	0,014	0,0
Al (394,401)	–	115	39961	144	0,011	0,0
Ti (307,523)	OH (307,512)	561	338173	1820	0,005	<b>0,2</b>
Ti (307,866)	–	278	407313	78	0,004	0,0
Ti (334,188)	Nb (334,198)	517	938986	7828	0,001	<b>0,4</b>
V (311,070)	Ti (311,070)	-14	31781	8221	0,001	<b>0,4</b>
V (311,837)	–	25	32090	25	0,002	0,0
V (327,612)	OH (327,612)	51	17176	112	0,005	0,0
Mo (202,032)	–	40	2900	11	0,006	0,0
Mo (284,824)	Nb (284,829)	51	3561	2959	0,004	<b>0,9</b>
Mo (289,445)	Nb (289,442)	27	1659	1101	0,004	<b>0,8</b>
Ta (263,558)	–	23	438	73	0,002	0,0
Ta (267,590)	Nb (267,594)	35	209	25418	0,017	<b>27,7</b>
Ta (268,517)	Ti (268,514)	16	233	25742	0,011	<b>28,1</b>
W (207,912)	–	17	81	43	0,008	0,0
W (220,449)	Ta (220,410); Al (220,467)	46	99	85	0,008	<b>0,1</b>
W (222,962)	Ti (222,924); Nb (222,972)	43	83	192	0,014	<b>0,6</b>
Nb (294,154)	V (294,138)	38	150612	654	0,008	<b>0,2</b>
Nb (309,417)	–	24	168025	19	0,003	0,0
Nb (313,078)	Ti (313,081)	110	610437	60339	0,002	<b>4,5</b>
Zr (327,307)	–	31	21520	54	0,002	0,0
Zr (327,927)	Nb (327,925); Ta (327,927)	113	18791	2594	0,002	<b>0,2</b>
Zr (343,823)	–	34	71426	213	0,001	0,0

\* Значения концентрации интерферентов, значительно превышающие предел обнаружения, выделены жирным шрифтом

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 Al (а), Ti (б), V (в), Mo (г), Ta (д), W (е), Nb (ж), Zr (з).

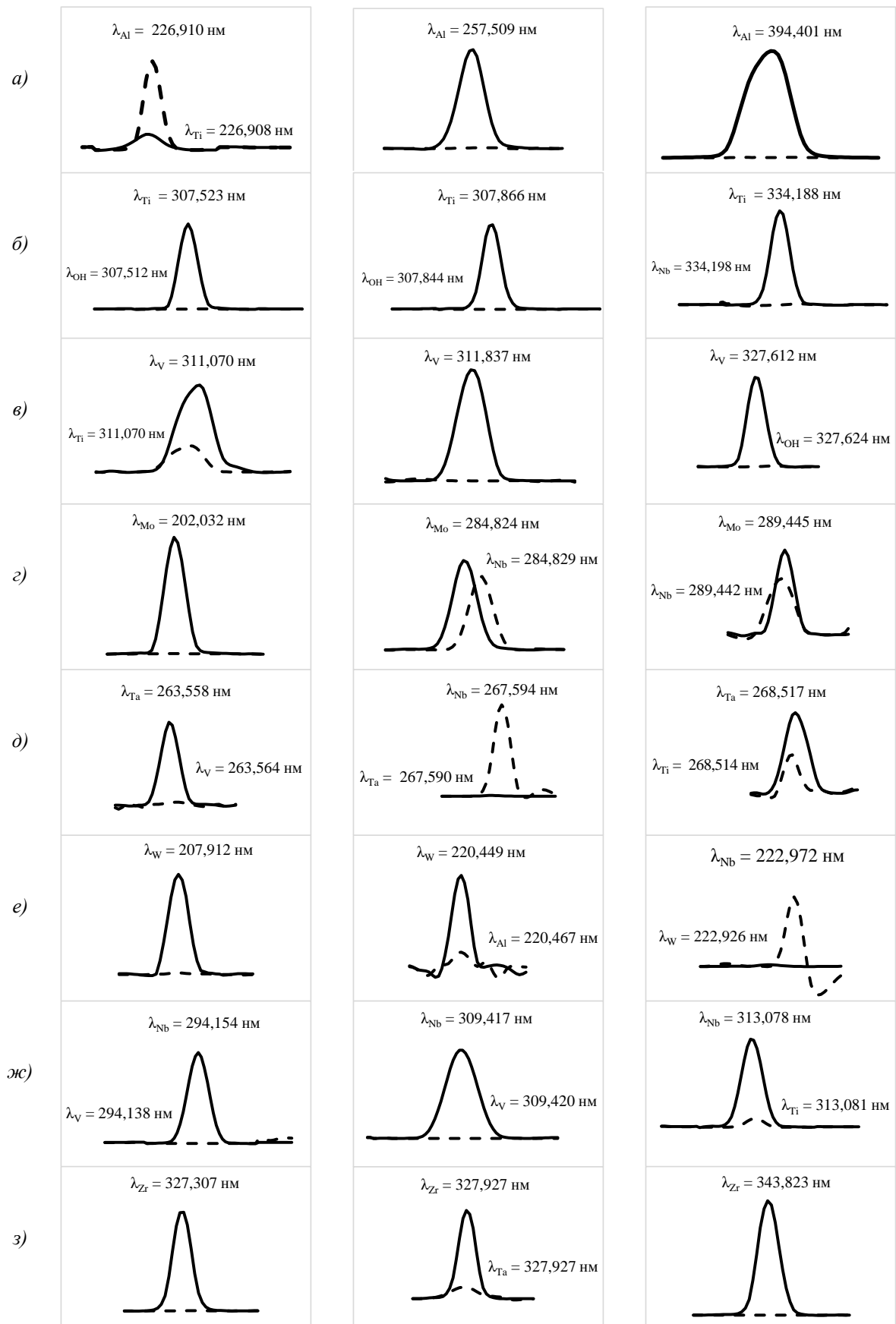


Рис. 2. Спектры растворов для аналитов А (—) и для интерферентов И (- - -) ( $\lambda$  – длина волны)

Исходя из полученных интенсивностей (табл. 2) и вида спектров вблизи спектральных линий аналитов (рис. 1), выбраны свободные от существенных интерференций аналитические линии, пригодные для количественного определения Ti, Nb, Al, Mo, V, Zr, Ta, W в титановых орто-сплавах (табл. 3).

Таблица 3

**Результаты выбора спектральных линий, свободных от значимых интерференционных наложений**

Элемент	Ti	Nb	Al	V	Mo	Ta	W	Zr
Аналитическая линия, нм	307,866	309,417	257,509	311,837	202,032	263,558	207,912	327,307
Альтернативная аналитическая линия, нм	336,122	319,497	394,401	327,612	281,615	–	248,923	343,823

Для того чтобы компенсировать помехи не спектрального происхождения, проявляющиеся во время анализа, – например, небольшие изменения: мощности генератора магнитного поля, формирующего плазму; расхода потоков газа; скорости распыления аэрозоля и т. п., – в АЭС ИСП используют внутренний стандарт.

Для использования приема внутренней стандартизации при определении Ti, Nb, Al, Mo, V, Zr, Ta, W в титановых орто-сплавах предварительно выбраны индий, скандий и рений, которые не входят в состав исследуемых в данной работе орто-сплавов даже на уровне примесей. При этом выбранные элементы не выпадают в осадок и не образуют летучих соединений в условиях эксперимента.

Для выбранных свободных от интерференций линий внутреннего стандарта проведена проверка эффективности их применения при изменении мощности генератора магнитного поля, формирующего плазму (рис. 3).

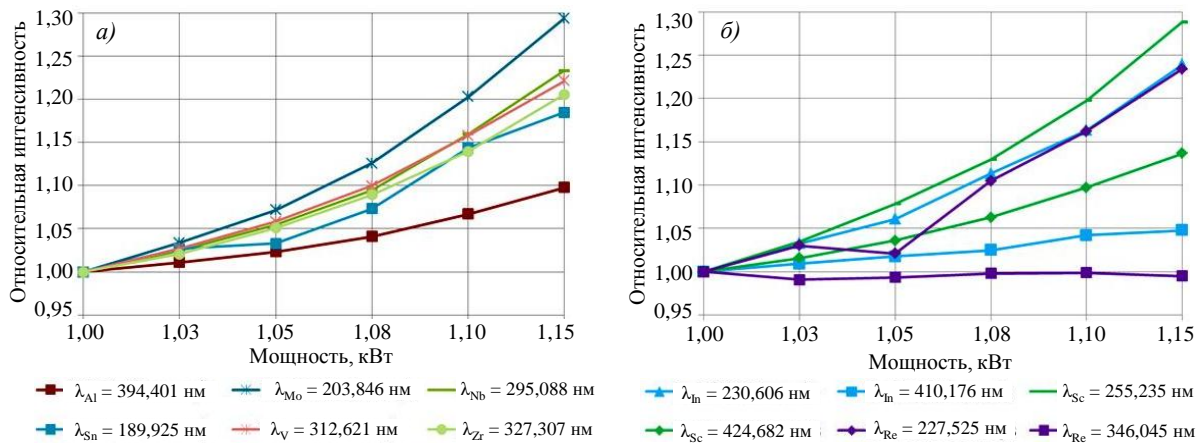


Рис. 3. Изменение интенсивности сигнала аналитов (а) и элементов внутренних стандартов (б) при изменении мощности генератора

При увеличении с небольшим шагом мощности генератора с 1,00 до 1,15 кВт интенсивность эмиссии элементов и внутреннего стандарта увеличивается, но в разной степени – например, для Al при  $\lambda = 394,401$  – на 10 % отн., а для Mo при  $\lambda = 203,846$  – на 30 % отн.

Для того чтобы правильно скомпенсировать случайные колебания мощности плазмы для каждой линии аналита рекомендуется использовать подходящую линию внутреннего стандарта, интенсивность которой меняется схожим образом (табл. 4).

Таблица 4

**Аналитические линии элементов и соответствующие им  
спектральные линии внутренних стандартов**

Элемент	Аналитическая линия, нм	Спектральная линия, нм, внутреннего стандарта элемента		
		Sc	In	Re
Ti	237,312	424,682	352,803	455,403
Nb	223,061	365,179	352,803	455,403
Al	214,439	255,235	233,477	233,527
Mo	230,606	255,235	233,477	233,527
V	610,365	365,179	352,803	455,403
Zr	293,931	365,179	233,477	233,527
Ta	288,317	365,179	233,477	233,527
W	202,548	255,235	233,477	233,527

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 (табл. 5).

Таблица 5

**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 $S_L$ , % отн.
Ti	45–65	2	0,5	1
Nb	30–50	3	0,5	1
Al	5–15	2	0,5	1
Mo	0,001–0,1	8	3	4
	0,1–5	3	1	2
V	0,001–0,1	7	2	3
	0,1–5	4	1	2
Zr	0,001–0,1	7	1	2
	0,1–5	4	1	2
Ta	0,001–0,1	10	3	4
	0,1–5	4	1	2
W	0,001–0,1	9	2	4
	0,1–5	4	1	2

Исходная концентрация модельных растворов 2 г/дм<sup>3</sup>. От каждого исходного модельного раствора отбирали три серии по семь аликвотных частей, разбавляли в 20 раз и проводили совместное определение массовой доли элементов Ti, Nb, Al, и Mo, V, Zr, Ta, W, повторив эксперимент 2 раза со сменой оператора анализа. При этом для определения концентраций Mo, V, Zr, Ta, W в диапазоне от 0,001 до 0,1 % (по массе) использовали разбавление в 1,25 раза. По результатам измерений рассчитывали показатели: повторяемости, внутрилабораторной прецизионности и точности (табл. 5).

Таким образом, для совместного определения элементов в зависимости от уровня содержания выбраны объем аликвотных частей и разбавление (табл. 6).

Таблица 6

Диапазоны определяемых содержаний, объем аликвотных частей и колб		
Определяемые элементы	Диапазоны определяемых содержаний, % (по массе)	
Ti, Nb, Al, Mo, V, Zr, Ta, W	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

Навески экспериментальных проб орто-сплавов и стандартных образцов титановых сплавов помещали в автоклавы с герметичными крышками, растворяли в микроволновой системе разложения MARS6 в течение 45 мин: постепенный нагрев до 150 °С в течение 30 мин и выдержка 15 мин, затем охлаждение до 25 °С. Для выбора оптимального соотношения кислот в смеси для автоклавного разложения орто-сплавов провели две серии экспериментов с растворением навесок массой 0,2 и 0,4 г промышленной пробы сплава ВТИ-4 в шести разных составах кислотной смеси (табл. 7).

Таблица 7

Состав экспериментальных смесей для автоклавного разложения титанового сплава ВТИ-4

Условный номер состава	Объем реагентов, мл			
	H <sub>2</sub> O	HCl	HNO <sub>3</sub>	HF
1	–	10	–	–
2	5	5	0,25	0,25
3	5	5	0,5	0,5
4	5	5	1	1
5	10	–	1	1
6	10	–	2,5	2,5

После завершения растворения проб кислотные растворы количественно переносили в пластиковые мерные колбы вместимостью 100 мл и доводили до метки бидистиллированной водой. Затем растворы разбавляли и анализировали методом АЭС ИСП. При построении градуировочных зависимостей использовали метод добавок. На основании полученных результатов построены графики зависимости степени извлечения элементов из пробы в заданных условиях (рис. 4).

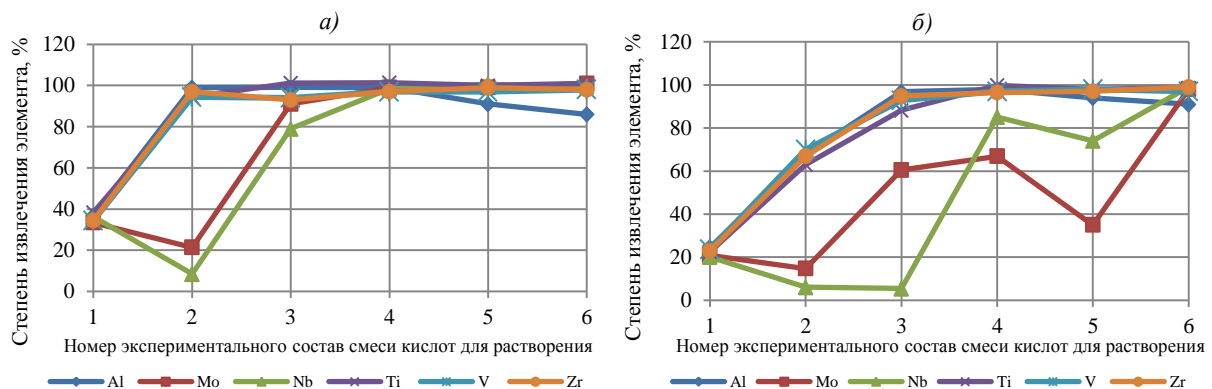


Рис. 4. Зависимость степени извлечения элементов из пробы сплава ВТИ-4 от состава кислотной смеси при растворении в системе микроволнового разложения

Видно, что составы с небольшим количеством  $\text{HNO}_3$  и  $\text{HF}$  не обеспечивают полного извлечения Nb и Mo, а в условиях избытка  $\text{HF}$  без  $\text{HCl}$  со временем возможно выпадение в осадок фторида алюминия. Поэтому, исходя из полученных данных, принято решение использовать навеску 0,2 г смеси 4 состава: 5 мл  $\text{H}_2\text{O}$  + 5 мл  $\text{HCl}$  + 1 мл  $\text{HNO}_3$  + 1 мл  $\text{HF}$  – для полного растворения проб сплава ВТИ-4 в указанных условиях в системе микроволнового разложения.

На завершающем этапе разработки для подтверждения правильности разработанной методики при определении Ti, Al, Mo, V, Zr использовали архивные стандартные образцы, выпущенные ВИАМ и ВИЛС, отечественных титановых сплавов различных марок. При определении Nb, Ta, W правильность проверяли методом «введено-найденно». Аттестованные значения элементов стандартных образцов, введенные в растворы добавки элементов и результаты, полученные методом АЭС ИСП, представлены в табл. 8 и 9.

Таблица 8

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

Наименование СО	Содержание элементов, % (по массе)				
	Ti	Al	Mo	V	Zr
BT6	91,2±0,3	5,40±0,05	0,031±0,002	3,54±0,04	0,029±0,002
	91,5±0,4	5,43±0,08	0,032±0,002	3,56±0,05	0,025±0,005
BT9	88,1±0,5	6,21±0,06	3,25±0,06	0,072±0,002	1,65±0,03
	87,8±0,5	6,13±0,09	3,21±0,09	0,071±0,006	1,68±0,04
BT22	84,3±0,4	5,80±0,05	5,43±0,05	5,15±0,05	0,051±0,002
	84,9±0,5	5,73±0,08	5,47±0,07	5,11±0,07	0,047±0,005

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

Таблица 9

**Введенные в растворы стандартных образцов добавки элементов  
и результаты их определения методом АЭС ИСП  
с доверительным интервалом (при  $n = 4$ ;  $P = 0,95$ )\***

Наименование СО	Содержание элементов, % (по массе)		
	Nb	Ta	W
BT6	<b>35</b>	<b>2</b>	<b>6</b>
	35,5±0,5	2,04±0,05	6,05±0,05
BT9	<b>50</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
	50,4±0,5	4,05±0,05	4,02±0,05
BT22	<b>65</b>	<b>6</b>	<b>2</b>
	65,6±0,8	6,03±0,05	2,03±0,05

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

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

### Заключения

Таким образом, разработана методика определения элементов основы Ti, Nb, Al и легирующих элементов Mo, V, Zr, W, Ta в титановых орто-сплавах методом АЭС ИСП. Экспериментально подобраны аналитические линии для определения Ti, Nb, Al, Mo, V, Zr, Ta, W. Выбраны элементы для внутренней стандартизации – Sc In и Re. Проведены исследования метрологических характеристик методики с использованием модельных растворов:

– для содержания элементов  $>0,001\%$  (по массе) показатель повторяемости не превышает  $3\%$  отн., а показатель промежуточной прецизионности не превышает  $4\%$  отн., показатель точности не превышает  $10\%$  отн.;

– для содержания элементов  $>0,1\%$  (по массе) показатель повторяемости не превышает  $1\%$  отн., а показатель промежуточной прецизионности не превышает  $2\%$  отн., показатель точности не превышает  $4\%$  отн.

Разработанная методика определения элементов основы Ti, Nb, Al и легирующих элементов Mo, V, Zr, W, Ta в титановых орто-сплавах методом АЭС ИСП может применяться также и для определения состава современных титановых сплавов типа ВТИ и ВИТ.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
2. Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В. и др. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением. М.: МИСиС, 2008. 328 с.
3. 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.
4. Абраимов Н.В., Петухов И.Г., Зарыпов М.С., Лукина В.В. К вопросу о жаростойкости титановых сплавов, работающих при температурах выше  $650\text{ }^\circ\text{C}$  // Электрометаллургия. 2021. № 12. С. 10–20.
5. 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.
6. 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.
7. Скворцова С.В., Умарова О.З., Анишук Д.С., Смирнов В.Г. Формирование структуры, фазового состава и механических свойств сплава на основе алюминиды титана  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  при термической обработке // Титан. 2015. № 3 (49). С. 29–33.
8. Скворцова 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.
9. 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: 09.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-39-47.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Подкопалов И.А. Обзор сплавов на основе интерметаллидов титана // Мавлютовские чтения: материалы XV Всерос. молодежной научной конф.: в 7 т. Уфа, 2021. Т. 2. С. 311–315.

15. 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.
16. Шубин И.Ю., Никитин Я.Ю., Пучков Ю.А. и др. 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.
17. Быков Ю.Г., Ночовная Н.А., Тимохин В.М., Алексеев Е.Б., Новак А.В., Захарова Е.С. Применение интерметаллидного титанового орто-сплава в блинговой конструкции направляющего аппарата компрессора высокого давления // *Электрометаллургия*. 2019. № 11. С. 19–26.
18. 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: 11.01.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
19. Надеждина М.Е., Шинкевич А.И., Шинкевич М.В. Система мониторинга цифрового производства предприятия нефтехимической промышленности // *Компетентность*. 2021. № 7. С. 36–39.
20. Карпов Ю.А., Барановская В.Б. Аналитический контроль – неотъемлемая часть диагностики материалов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 1-1. С. 5–12.
21. Архипенко А.А., Кошель Е.С., Барановская В.Б. Разработка методики дугового атомно-эмиссионного спектрального анализа оксида церия // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2021. Т. 87. № 11. С. 19–25.
22. Ночовная Н.А., Кочетков А.С., Боков К.А., Иванов В.И. Исследование литейных характеристик жаропрочного интерметаллидного титанового сплава ВТИ-4 // *Труды ВИАМ*. 2017. № 5 (53). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-2-2.
23. Умарова О.З. Закономерности формирования фазового состава и структуры в жаропрочном сплаве на основе интерметаллида титана ВТИ-4 при термической и термоводородной обработке: дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 179 с.
24. Оглодков М.С., Дуюнова В.А., Ночовная Н.А., Иванов В.И., Авиловцев Л.Ю. Особенности технологии изготовления деформированных заготовок из интерметаллидного сплава ВТИ-1 для деталей газотурбинного двигателя // *Труды ВИАМ*. 2021. № 12 (106). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-3-13.
25. Вячеславов А.В., Малинкина Ю.Ю., Бичаев В.Б., Титова А.Д., Ермолаева Т.Н. 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.
26. Барановская В.Б., Медведевских М.Ю., Карпов Ю.А. Актуальные проблемы качества химического анализа // *Аналитика и контроль*. 2021. Т. 25. № 4. С. 273–279.
27. Отто М. *Современные методы аналитической химии*: в 2 т. М.: Техносфера, 2003. Т. I. 416 с.
28. 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.
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). Ст. 01. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

#### References

1. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 520–530.
2. Kolobov Yu.R., Kablov E.N., Kozlov E.V. et al. *Structure and properties of intermetallic materials with nanophase hardening*. Moscow: MISiS, 2008, 328 p.

3. 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– $\beta$ -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
4. 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. *Elektrometallurgiya*, 2021, no. 12, pp. 10–20.
5. Nochovnaya N.A., Panin P.V., Alekseev E.B., Novak A.V. Patterns of the formation of the structural-phase state of alloys based on ortho- and gamma-titanium aluminides in the process of thermomechanical treatment. *Vestnik RFFI*, 2015, no. 1, pp. 18–26.
6. Novak A.V. *Regularities of the effect 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.
7. 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 Ti<sub>2</sub>AlNb during heat treatment. *Titan*, 2015, no. 3 (49), pp. 29–33.
8. Skvortsova S.V., Umarova O.Z., Agarkova E.O., Chernyshova A.A. Influence of heat treatment on the structure and mechanical properties of the plate from the VTI-4 intermetallic alloy. *Titan*, 2015, no. 4 (50), pp. 17–21.
9. 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: January 09, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-39-47.
10. 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.
11. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.
12. Alekseev I.E., Pilipenko A.A., Varfolomeev M.S. The possibility of replacing nickel heat-resistant alloys with alloys based on the Ti–Al intermetallic compound. *Rapidly quenched materials and coatings*: Proceedings of the XIX Intern. sci.-tech. conf. Moscow, 2022, pp. 311–315.
13. 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.
14. Podkopalov I.A. Review of alloys based on titanium intermetallic compounds. *Mavlyutovskie readings: materials of XV All-Rus. youth scientific conference*: in 7 vols. Ufa, 2021, vol. 2, pp. 311–315.
15. Polkin I.S., Egorova Yu.B., Davydenko L.V. Alloying, phase composition and mechanical properties of titanium alloys. *Technology of light alloys*, 2022, no. 2, pp. 4–13.
16. Shubin I.Yu., Nikitin Ya.Yu., Puchkov Yu.A. et al. Investigation 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. Bauman. Ser.: Mechanical engineering*, 2020, no. 6 (135), pp. 83–105.
17. Bykov Yu.G., Nochovnaya N.A., Timokhin V.M., Alekseev E.B., Novak A.V., Zakharova E.S. Application of intermetallic titanium ortho-alloy in the bling design of the high-pressure compressor guide vane. *Electrometallurgiya*, 2019, no. 11, pp. 19–26.
18. 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: January 11, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-30-40.
19. Nadezhdina M.E., Shinkevich A.I., Shinkevich M.V. Monitoring system for digital production of an enterprise of the petrochemical industry. *Kompetentnost*, 2021, no. 7, pp. 36–39.
20. Karpov Yu.A., Baranovskaya V.B. Analytical control is an integral part of material diagnostics. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 1-I, pp. 5–12.
21. Arkhipenko A.A., Koshel E.S., Baranovskaya V.B. Development of a technique for arc atomic emission spectral analysis of cerium oxide. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2021, vol. 87, no. 11, pp. 19–25.

22. Nochovnaya N.A., Kochetkov A.S., Bokov K.A., Ivanov V.I. Research the characteristics of casting titanium superalloy VTI-4. *Trudy VIAM*, 2017, no. 5 (53), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 10, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-2-2.
23. Umarova O.Z. *Patterns of formation of phase composition and structure in a heat-resistant alloy based on titanium intermetallic compound VTI-4 during thermal and thermohydrogen treatments*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2017, 179 p.
24. Oglodkov M.S., Duyunova V.A., Nochovnaya N.A., Ivanov V.I., Avilochev L.Yu. Features of the technology manufacturing of deformed blanks from intermetallic alloys VIT1 for parts of the gas turbine engine. *Trudy VIAM*, 2021, no. 12 (106), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 11, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-3-13.
25. Vyacheslavov A.V., Malinkina Yu.Yu., Bichaev V.B., Titova A.D., Ermolaeva T.N. 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.
26. 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.
27. Otto M. *Modern methods of analytical chemistry*: in 2 vols. Moscow: Technosfera, 2003, vol. I, 416 p.
28. 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.
29. Karpov Yu.A., Baranovskaya V.B. Problems of standardization of methods of chemical analysis 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](mailto:admin@viam.ru)

**Алексеев Евгений Борисович**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Карачевцев Федор Николаевич**, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Загвоздкина Татьяна Николаевна**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### *Information about the authors*

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

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

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

**Tatyana N. Zagvozdina**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 02.02.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.02.2023.

The article was submitted 02.02.2023; approved and accepted for publication after reviewing 16.02.2023.