



УДК 669.295

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-6-6

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО  
СОСТАВА СЛИТКОВ ОПЫТНОГО  
ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

*А.А. Ширяев*

*Н.А. Ночовная*  
*доктор технических наук*

**Сентябрь 2015**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

*А.А. Ширяев<sup>1</sup>, Н.А. Ночовная<sup>1</sup>*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СЛИТКОВ ОПЫТНОГО ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

*Исследованы химический состав и структура слитков из опытного псевдо-β-титанового сплава системы легирования Ti–Al–Mo–V–Cr–Fe–Sn–Zr–PЗМ, изготовленных путем тройного вакуумно-дугового переплава в печи ALD VAR L200 по экспериментальным режимам. Выявлена взаимосвязь между равномерностью распределения легирующих элементов в слитках и технологическими параметрами их выплавки.*

**Ключевые слова:** *псевдо-β-титановые сплавы, высокопрочные титановые сплавы, слитки, химический состав, вакуумно-дуговая плавка.*

*A.A. Shiryaev, N.A. Nochovnaya*

## **Study of structure and chemical composition of pilot high-alloyed titanium alloy ingots**

*Chemical composition and structure of a pilot near-beta Ti–Al–Mo–V–Cr–Fe–Sn–Zr–REM titanium alloy ingots have been studied, the ingots having been obtained by means of experimental threefold remelting processes with the use of ALD VAR L200 vacuum-arc furnace. A correlation between alloying elements distribution homogeneity in the ingots and melting technological parameters thereof has been revealed.*

**Keywords:** *near-beta titanium alloys, high-strength titanium alloys, ingots, chemical composition, vacuum-arc melting.*

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

## Введение

При увеличении количества применяемых в конструкции планера современных самолетов деталей из титановых материалов [1], с учетом повышения требований к экономичности изделий при их производстве и эксплуатации [2], особое значение приобретают вопросы, связанные с улучшением технологичности сплавов, в том числе титановых, и повышение их ресурсных характеристик. Для решения этой задачи наиболее перспективной представляется разработка новых псевдо- $\beta$ -титановых сплавов, обладающих высоким уровнем технологической пластичности в закаленном состоянии и способных к эффективному термическому упрочнению, обеспечивающему высокие уровень эксплуатационных свойств деталей и их весовую отдачу.

Практика промышленного производства показывает, что несмотря на ряд преимуществ для изготовления некоторых псевдо- $\beta$ -титановых сплавов необходимо применение сложных комплексных технологий с целью получения качественных полуфабрикатов, что обуславливает ограничения с позиции экономичности их изготовления. Однако с учетом рационального легирования, микролегирования и применения оптимальной технологии вакуумно-дугового переплава слитков существует возможность сохранить все преимущества псевдо- $\beta$ -титановых сплавов при умеренной экономической эффективности их производства.

Исходя из вышеперечисленных особенностей, целью настоящей работы является исследование влияния различных режимов изготовления слитков из опытного высокопрочного псевдо- $\beta$ -титанового сплава методом вакуумно-дуговой плавки на структуру и распределение легирующих элементов по их сечению для последующей оптимизации технологического процесса.

## Материалы и методы

Исследования проведены на лабораторных слитках диаметром 200 мм и массой 34,5 кг (каждый), полученных путем тройного вакуумно-дугового переплава в печи ALD VAR L200, из опытного псевдо- $\beta$ -титанового сплава системы легирования Ti-Al-Mo-V-Cr-Fe-Sn-Zr-P3M ( $[Mo]_{\text{экв}}=18,2\%$ ;  $[Al]_{\text{экв}}=4,1\%$ ). Печь производства фирмы ALD Vacuum Technologies GmbH (Германия) оснащена компьютерной системой управления и позволяет осуществлять процесс плавки как в автоматическом, так и ручном режиме.

В качестве шихтовых материалов для выплавки экспериментальных слитков использовали: титан губчатый (ТГ90), цирконий иодидный, ванадий (ВнМ-1), железо

Армко, олово (О1), хром электролитический (ЭРХ-1) и лигатуры ВХМА-1, АлИт-5 и ВнАлЖД1.

Технологический процесс изготовления слитков заключался в подготовке шихтовых материалов, прессовании расходуемых электродов, выплавке и резке слитков на заготовки и исследовании их качества.

Прессованные расходуемые электроды диаметром 100 мм изготовлены на гидравлическом прессе методом непрерывного проходного прессования в конусную матрицу по традиционной технологической схеме. Плавка проводилась в кристаллизаторы диаметром 130, 160 и 200 мм при первом, втором и третьем перепадах соответственно.

В процессе выплавки экспериментальных слитков варьировали силу тока дуги, при этом остальные параметры преимущественно не изменились. Значения изменяемого параметра (силы тока) приведены в табл. 1. Типичная диаграмма выплавки приведена на рис. 1.

Таблица 1

**Значения силы тока дуги при выплавке экспериментальных слитков**

Условный номер слитка	Сила тока дуги, А, при перепадах		
	первом	втором	третьем
1	1600	2170	2500
2	2100	2850	2500
3			3000

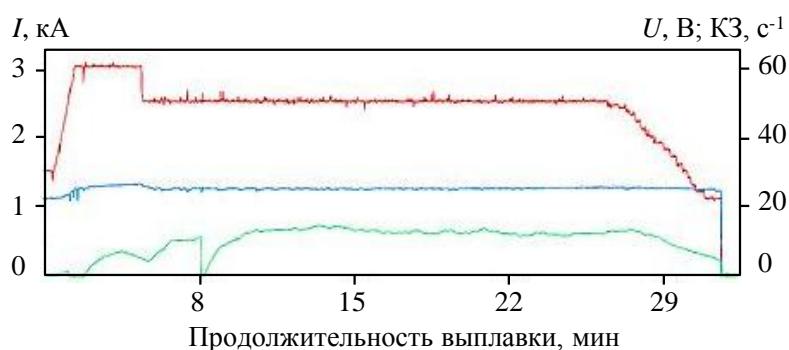


Рисунок 1. Типичная диаграмма выплавки слитков (слиток 2, третий перепад):

— сила тока, кА; — напряжение, В; — капельное замыкание (КЗ), с<sup>-1</sup>

После выплавки слитки разрезали на заготовки для исследования структуры и химического состава, а также определения характера, размеров и плотности литейных дефектов (глубины усадочной раковины, характера рассеянной пористости и т. д.).

Микрошлифы для металлографических исследований изготавливали по стандартной методике. Поверхность макрошлифов подготавливали путем шлифования (до 7-го класса степени шероховатости). Макро- и микроструктуру образцов исследовали согласно ПИ1.2.785–2009 «Металлографический анализ титановых

сплавов» соответственно на микроскопах Wild Heerbrugg M8 ( $\times 6$ ) и Versamet (от  $\times 300$  до  $\times 600$ ) с использованием цифрового приемника изображения.

Макроструктуру исследовали по методике «голубого» травления в соответствии с СТП1-595-5-318–96. Приготовление макрошлифов по методике «голубого» травления – многостадийный процесс, состоящий из операций обезжиривания, активации поверхности, анодирования, проявления и горячей промывки. Данный метод позволяет выделить инородные, резко отличающиеся по химическому составу включения, непролавы и другие дефекты в слитках и полуфабрикатах. Структура титанового сплава при этом принимает серый цвет различных оттенков, а включения окрашиваются в голубой, интенсивный синий или фиолетовый цвета.

Определение химического состава проводили атомно-эмиссионным методом (в соответствии с ГОСТ 19863.1-19863.16), исследование распределения основных легирующих элементов по сечению слитков – методом рентгенофлуоресцентного спектрального анализа. Для проведения данного исследования образцы (по 9 шт. из каждого слитка; размером  $25 \times 25$  мм,  $h=10-20$  мм) вырезали в одинаковом порядке из верхнего, среднего и донного сечений из трех зон (краевой, промежуточной, серединной) слитка. Методом масс-спектрометрического анализа на спектрометре ICAP Q с помощью приставки лазерного пробоотбора (МИ1.2.054–2013)\* с более высокой разрешающей способностью (10 зон по радиусу слитка) изучали распределение РЗМ в образцах из титановых сплавов.

## Результаты

Известно, что практически для всех металлических сплавов качество и характеристики однородности исходного полуфабриката (в частности, слитков) играют важную роль при последующей их термомеханической и термической обработке (это характерно для конструкционных сталей [3], титановых сплавов [4, 5], а также жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана [6–10]).

Необходимо отметить, что для ряда титановых сплавов существует проблема образования ликвационной неоднородности – зон, обогащенных одними элементами и обедненных другими [11]. Характер деформации данных неоднородностей в процессе изготовления полуфабрикатов существенно отличается от основного материала, что в конечном итоге приводит к появлению зон с разной структурой как на макро-, так и на микроуровне и, соответственно, снижению равномерности механических свойств по сечению конечных полуфабрикатов и общему снижению комплекса эксплуатационных свойств материала.

---

\*Исследования выполнены при участии Ф.Н. Карачевцева, А.В. Алексеева, П.С. Петрова.

Сложность задачи получения качественных слитков из высоколегированных титановых сплавов методом вакуумно-дуговой плавки обусловлена ее характерными особенностями. В отличие от непрерывного литья (например, алюминиевых сплавов) в процессе вакуумно-дуговой плавки в большинстве случаев равновесия между скоростью сплавления и кристаллизацией металла не достигается [12], поэтому глубина ванны и скорость кристаллизации металла в донной, серединной и верхней частях слитка различны, что, в свою очередь, влияет на структурные характеристики и распределение легирующих элементов в этих зонах.

При выборе основных технологических параметров плавки (сила тока и напряжение дуги, временные интервалы плавления и выведения усадочной раковины и др.) необходимо учитывать следующие факторы:

- температуру плавления компонентов, поскольку сплавы на основе титана могут содержать как алюминий, температура плавления которого значительно ниже температуры плавления титана, так и тугоплавкие элементы (ниобий, молибден и др.), введение которых в сплав в чистом виде может привести к образованию металлургических дефектов;

- плотность компонентов: например, плотность алюминия в несколько раз меньше плотности других компонентов сплава, что в большой степени провоцирует перманентное расслаивание расплава в ванне с последующим формированием химической неоднородности и сегрегации [13];

- термодинамический фактор: протекание различных фазовых превращений в процессе затвердевания и последующего охлаждения слитка, температурный интервал кристаллизации сплава и др. особенности.

Согласно ряду исследований одним из основных технологических недостатков сплавов, в которых легирование осуществляется преимущественно эвтектоидообразующими  $\beta$ -стабилизаторами (Fe, Cr) и некоторыми другими легирующими элементами (например, Mo или Zr), является высокая склонность их к образованию ликвационных неоднородностей при выплавке слитков методом вакуумно-дугового переплава. Установлено, что уже при относительно небольших концентрациях Fe, как в сплаве системы Ti–10V–2Fe–3Al, проблема образования химических неоднородностей, т. е. зон, обогащенных Fe и обедненных Al, является актуальной [11]. Вышеотмеченные дефекты в деформированных в  $(\alpha+\beta)$ -области полуфабрикатах характеризуются значительно увеличенным размером зерна и пониженным количеством глобулярной  $\alpha$ -фазы, что приводит к снижению равномерности механических свойств по сечению полуфабрикатов в

термически упрочненном состоянии и общему снижению комплекса эксплуатационных свойств материала. Поскольку авторами статьи [11] показано, что уменьшить уровень макроликвации путем термической или термомеханической обработки практически невозможно, то единственным реальным способом избежать образования неоднородностей является тщательный выбор вида и технологической схемы выплавки слитков. Тем не менее железо является одним из основных легирующих элементов в таких высокопрочных сплавах, как Timetal LSB и Timetal 125, обладающих, при условии соблюдения требуемой технологии их обработки, высоким комплексом механических свойств ( $\sigma_B=1400\text{--}1600$  МПа,  $\tau_{\text{среза}}=800\text{--}870$  МПа) [14]. Применение Fe как легирующего элемента оказывает положительное влияние на коррозионную стойкость изделий, в частности на щелевую коррозию при эксплуатации в морской среде [15, 16]. Необходимо отметить, что сплавы, в составе которых содержится хром, также отличаются высоким уровнем механических свойств и технологичности [17]. Хром и в особенности железо характеризуются низкой стоимостью, что в совокупности с высокой эффективностью среди остальных  $\beta$ -стабилизирующих элементов делает их применение в титановых сплавах экономически выгодным.

Из проведенного анализа видно, что при разработке новых композиций титановых сплавов вопросы склонности ряда элементов (по отдельности или в комбинации с другими составляющими) к ликвации занимают одно из первых мест, однако зачастую стремление к упрощению технологических процессов идет вразрез с постоянно растущими требованиями к физико-механическим свойствам материалов.

В соответствии с этими требованиями создание новых псевдо- $\beta$ -титановых сплавов, обладающих улучшенными или специальными свойствами, в большинстве случаев уже не может быть реализовано без использования легирующих элементов, способствующих усложнению каких-либо этапов технологического процесса изготовления конечных полуфабрикатов.

Наиболее предпочтительным и рациональным, по мнению авторов, путем создания нового универсального высокопрочного высокотехнологичного псевдо- $\beta$ -титанового сплава является подход, базирующийся на комбинации целого ряда принципов. К ним относятся комплексное легирование, соблюдение оптимального взаимного соотношения содержания легирующих элементов, микролегирование, оптимальное сочетание технологичности изготовления полуфабрикатов и уровня их эксплуатационных свойств, возможность применения специальных методов деформационной и термической обработки [18–22].

Именно в соответствии с данным подходом авторами был разработан химический состав опытного псевдо- $\beta$ -титанового сплава системы легирования Ti–Al–Mo–V–Cr–Fe–Sn–Zr–P3M, который должен обладать высоким уровнем технологической пластичности в закаленном состоянии, эффективно упрочняться посредством термической обработки и не требовать обязательного применения специальных технологий при изготовлении листовых полуфабрикатов из него [23]. Однако ввиду наличия хрома и железа в его составе необходимо провести более тщательные и всесторонние исследования в области оптимизации технологических параметров выплавки слитков.

С этой целью изготовлена партия слитков диаметром 200 мм и массой по 34,5 кг (каждый).

Визуальный осмотр слитков показал, что их поверхность (в том числе слитков, выплавленных при низкой силе тока в процессе последнего переплава) характеризуется хорошим качеством:

- глубоких каверн, непроплавов и неоформления поверхности на боковой части слитков не наблюдается;
- несмотря на большую высоту «короны» (до 10 см) ее толщина мала, что способствует уменьшению потерь металла при выплавке;
- в донной части слитка иногда наблюдаются локальные неглубокие (до 0,5–1 см) каверны и частичное неоформление поверхности, обусловленные началом плавки при невысоких значениях силы тока, наиболее интенсивным теплоотводом в донной части кристаллизатора и, как следствие, отсутствием жидкой ванны большого объема.

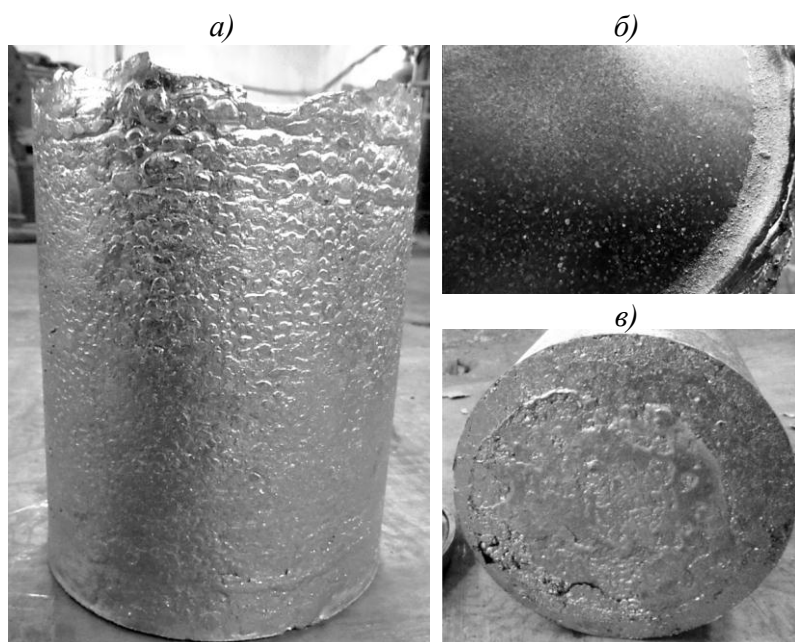


Рисунок 2. Внешний вид боковой (а), литниковой (б) и донной (в) поверхностей слитка 1

Перечисленные дефекты при необходимости можно устранить посредством корректировки технологических параметров в сторону увеличения силы тока дуги и продолжительности его поддержания на начальной стадии выплавки слитка до перехода к выплавке по основному режиму. Для уменьшения потерь металла при выплавке слитка желательно использовать пластины (диски) не из чистого титана, а из сплава целевого химического состава. Эти пластины обычно кладут на дно кристаллизатора перед началом плавки, обеспечивая его дополнительную защиту от проплавления на стадии наведения ванны жидкого металла, что особенно актуально при применении высоких токов в начале плавления. Внешний вид поверхности слитка *1* приведен на рис. 2.

Анализ продольных диаметральных и поперечных срезов слитков показал, что расположение, характер и размер усадочной раковины в слитках опытного сплава зависят от режима выплавки, продолжительности и режима вывода усадочной раковины. В слитках, выплавленных по скорректированному режиму с более длительной стадией вывода усадочной раковины, несмотря на ее присутствие в большинстве случаев, раковина имеет меньший объем и располагается ближе к верхней части слитка. Визуальный анализ срезов выявил наличие незначительной рассеянной пористости, характерной для высоколегированных титановых сплавов [12]. Известно, что при последующей деформационной обработке рассеянная пористость заваривается (при условии, что поры не выходят на поверхность обработанного слитка и не образуют взаимосвязанных скоплений) без формирования дефектов в объеме полуфабриката.

С целью выявления особенностей влияния технологических режимов выплавки на структуру получаемых слитков были проведены исследования макро- и микроструктуры в трех зонах (донной, серединной и верхней) в продольном и поперечном сечениях. Макроструктура темплетов, обработанных по традиционной методике травления, приведена на рис. 3.

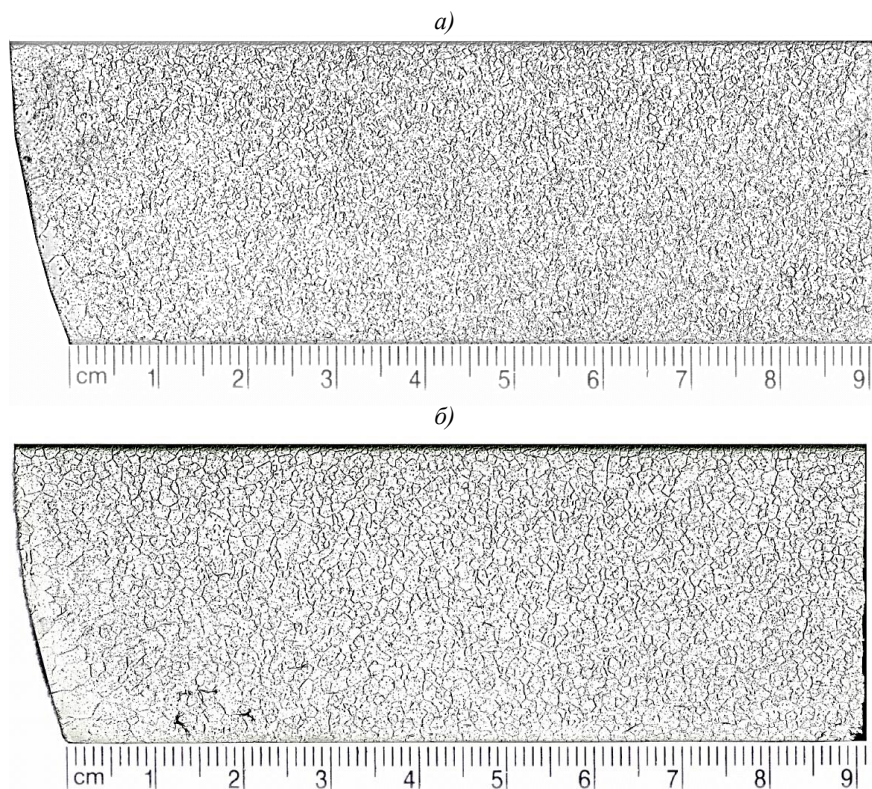


Рисунок 3. Макроструктура поперечных срезов донной части слитков экспериментального сплава:

*a* – слиток 1; *б* – слиток 3

Макроструктура экспериментальных слитков представлена зонами столбчатых и равноосных кристаллов, что типично для слитков из титановых сплавов. Рост столбчатых кристаллов в слитках происходит в направлении наибольшего теплоотвода. Поперечные срезы характеризуются крупными полиэдрическими зёрнами  $\beta$ -фазы. Сравнение макроструктуры слитков, выплавленных по различным режимам, позволило сделать вывод, что размеры структурных составляющих (в частности, поперечные размеры кристаллов) прямо пропорционально зависят от силы тока при последнем переплаве, особенно это характерно для донной области слитков, где теплоотвод и интенсивность их охлаждения самые сильные. Однако в объёме всего слитка изменение силы тока плавления в исследуемых пределах не привело к значительному измельчению структурных составляющих.

Обработка макрошлифов экспериментального сплава по методике «голубого» травления привела к более контрастному выделению зеренной структуры сплава, при этом не произошло растравливания границ зёрен, характерного для традиционного травления высоколегированных титановых сплавов в однофазном состоянии. Типичная макроструктура после «голубого» травления приведена на рис. 4.

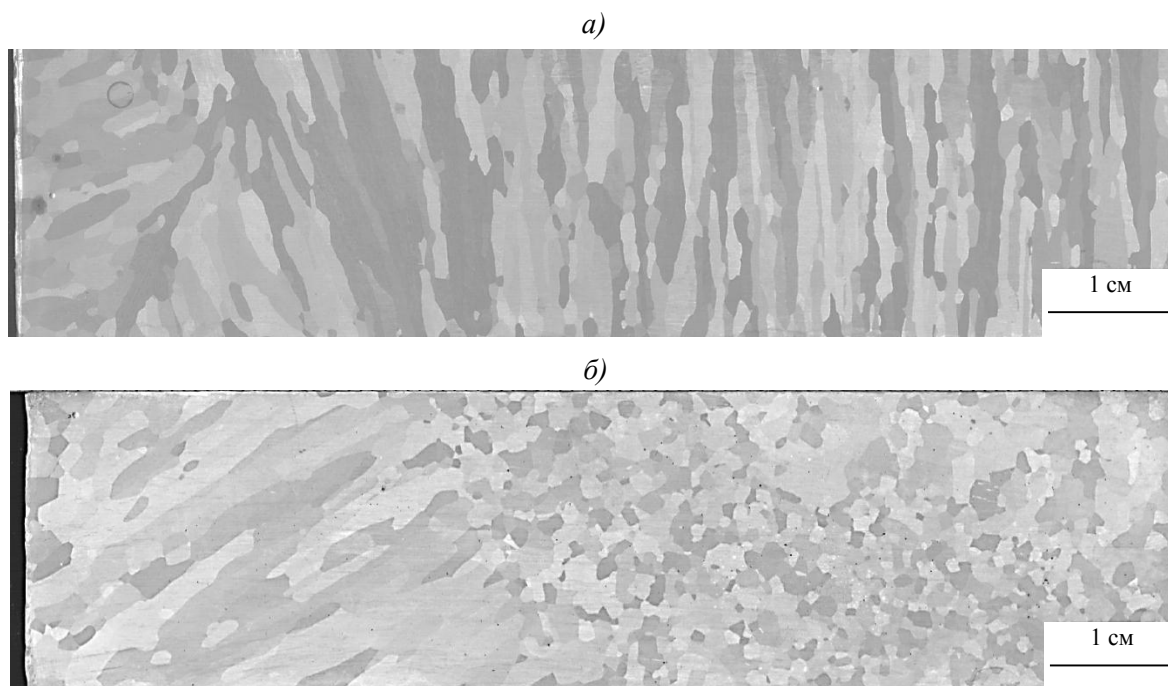


Рисунок 4. Макроструктура продольного среза образцов экспериментального сплава, обработанных по методике «голубого» травления:

*а* – слиток 1 (донная часть); *б* – слиток 3 (верхняя часть)

На исследованных макрошлифах, обработанных по методике «голубого» травления, металлургических дефектов (непроплавы исходных (шихтовых) материалов, включения и др.) не обнаружено.

Характер макроструктуры принципиально не отличается от структуры, полученной методом традиционного травления, но визуально размер зерна кажется несущественно больше, что, вероятно, связано с близкой кристаллографической ориентировкой некоторых зерен, имеющих общие границы, и, соответственно, недостаточным цветовым контрастом между ними.

Проведенные металлографические исследования показали, что микроструктура слитков и их зон, состоящая из крупных полиэдрических зерен  $\beta$ -фазы, характерна для литой структуры высоколегированных титановых сплавов.

По результатам атомно-эмиссионного химического анализа выявлено хорошее соответствие шихтового и фактического химического состава выплавленных слитков. Наибольшее отклонение наблюдается у иттрия: содержание его в сплаве на 25–30% (отн.) меньше, чем в шихте, что подтверждается и методом спектрального анализа. Исходя из того, что контрольные исследования алюминиево-иттриевой лигатуры (ТУ1712-029-25087982–99) методом атомно-эмиссионного химического анализа подтвердили хорошее соответствие ее фактического химического состава данным, указанным заводом-изготовителем в сертификате, следует, что условия,

возникающие в процессе вакуумно-дуговой плавки, способствуют испарению иттрия или его соединений.

Результаты исследований химического состава слитков, проведенные методом спектрального анализа, обработаны с целью выявления тенденций изменения однородности распределения легирующих элементов по слитку в зависимости от режима выплавки. В качестве наиболее подходящего метода оценки, который позволил бы выявить общие закономерности изменения характеристик химической однородности, выбрано сравнение стандартных отклонений по каждому из легирующих элементов. В методах статистического анализа стандартное отклонение (СО, % (по массе)) показывает, насколько широко разбросаны точки данных относительно их среднего значения, и вычисляется по формуле:

$$CO = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

где  $x$  – выборочное среднее значение,  $n$  – размер выборки.

Количественная оценка разницы между значениями стандартных отклонений в технологическом плане характеризует возможность управления (и степень оказываемого влияния) характеристиками однородности каждого из легирующих элементов посредством изменения значения силы тока дуги в выбранных в данной работе пределах. Значения стандартного отклонения представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения стандартного отклонения содержания основных легирующих элементов по сечению слитков из опытного псевдо-β-титанового сплава**

Условный номер слитка	Стандартное отклонение, % (по массе)							
	Al	Mo	V	Cr	Fe	Sn	Zr	Y
1	0,062	0,056	0,307	0,102	0,049	0,035	0,046	0,003
2	0,065	0,061	0,161	0,094	0,036	0,037	0,014	0,007
3	0,085	0,074	0,229	0,114	0,028	0,051	0,019	0,006
Разброс значений стандартных отклонений*, % (отн.)	33	28	63	19	56	39	122	75

\*Использован для оценки степени воздействия изменения режимов выплавки на характеристики однородности сплава.

По данным табл. 2 видно, что значительно всего изменяются показатели однородности для ванадия, железа, олова, циркония и иттрия. Так, самая высокая однородность распределения ванадия наблюдается в слитке 2, полученного на первом-втором переделах при высокой силе тока, а на третьем – при низкой. Полученные результаты можно объяснить тем, что ванадий вводится в сплав в виде относительно

тугоплавких лигатур ВХМА-1 и ВнАлЖ ( $T_{пл} \sim 1850^{\circ}\text{C}$ ), которые при низкой силе тока в процессе первого переплава расплавляются и перемешиваются в жидкой ванне менее интенсивно и равномерно. Применение лигатуры ВХМА-1 обусловлено недопустимостью введения тугоплавкого молибдена в чистом виде, однако ее использование приводит к определенным ограничениям по технологическим параметрам выплавки слитков (в части повышения силы тока плавления при первых переплавах) и требует обязательного применения тройного переплава. Аналогичным образом изменяется степень однородности распределения циркония. Для олова (легкоплавкого и тяжелого металла) наиболее благоприятными являются режимы, в которых последний переплав проводится при невысокой силе тока, в ванне малой глубины, при этом зависимость степени однородности его распределения от силы тока при первом и втором переплавах не обнаружена. Для железа наиболее предпочтительнее режимы плавки при относительно высоких значениях силы тока токах во всех переплавах (слиток 3), либо только в процессе первых двух (слиток 2), что, вероятно, обусловлено способом его введения в сплав. Анализ распределения иттрия показал, что высокая степень однородности достигается при плавке при низких значениях силы тока на всех трех переплавах (слиток 1). Аналогичные результаты получены при исследованиях (методом масс-спектрометрического анализа) однородности распределения иттрия. Они обусловлены тем, что с целью введения легкоплавкого алюминия и микролегирования иттрием в сплав вводится алюминиево-иттриевая лигатура, температура плавления которой составляет  $\sim 850^{\circ}\text{C}$ . Вероятно, введение иттрия в сплав в виде лигатур, которые по температуре плавления более близки титану, позволило бы уменьшить уровень ликвации. В качестве одного из вариантов такой лигатуры можно рассмотреть систему Ti–Y с содержанием иттрия до 20–25% (по массе), однако для промышленного ее внедрения необходимы разработка технологии изготовления и нормативной документации, проведение всесторонних исследований.

Таким образом, с учетом выявленных закономерностей можно сделать вывод, что режим выплавки слитков экспериментального псевдо- $\beta$ -титанового сплава необходимо выбирать исходя из комплексного анализа степени однородности распределения легирующих элементов с учетом их фактического содержания в сплаве, прогнозируемых возможных предельных отклонений их содержания в слитке и результирующей оценки влияния данных отклонений на окончательные свойства сплава.

На основании вышеизложенного рациональной (с позиции однородности слитка по химическому составу) следует считать режим выплавки слитка 2: при относительно высокой силе тока при первом–втором перепадах, при низкой силе тока – при третьем перепаде. Именно такой подход обеспечивает максимальное распределение ванадия, содержание которого в сплаве и предельные отклонения по слитку наиболее велики по сравнению с остальными элементами.

С учетом того что в научно-технической литературе и других источниках не представлено достаточно информации по особенностям распределения иттрия и других редкоземельных элементов при выплавке слитков из титановых сплавов, а проведенные ранее авторами исследования не были на это направлены, то изучение указанных закономерностей является важной задачей. Для ее решения методом масс-спектрометрического анализа на спектрометре ICAP Q с приставкой лазерного пробоотбора, которая позволяет измерять содержание микропримесей и микролегирующих элементов в малых количествах с большей локальностью по сравнению с другими методами химического анализа (в частности, спектрального), проведены исследования. Полученные статистические характеристики однородности распределения иттрия в экспериментальных слитках приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Статистические характеристики однородности распределения иттрия в слитках экспериментального псевдо- $\beta$ -титанового сплава**

Условный номер слитка	Место анализа	Среднее значение содержания Y, % (по массе)	ОСКО*, %
1	Верх	0,074	7,6
	Середина	0,095	8,9
	Низ	0,082	11
3	Верх	0,072	14
	Середина	0,065	16
	Низ	0,091	10,0

\* ОСКО – относительное среднеквадратическое отклонение.

С целью выявления закономерностей и характера распределения иттрия по слитку построена гистограмма (рис. 5): зона 1 соответствует центральной области слитка, а зона 10 – краевой.

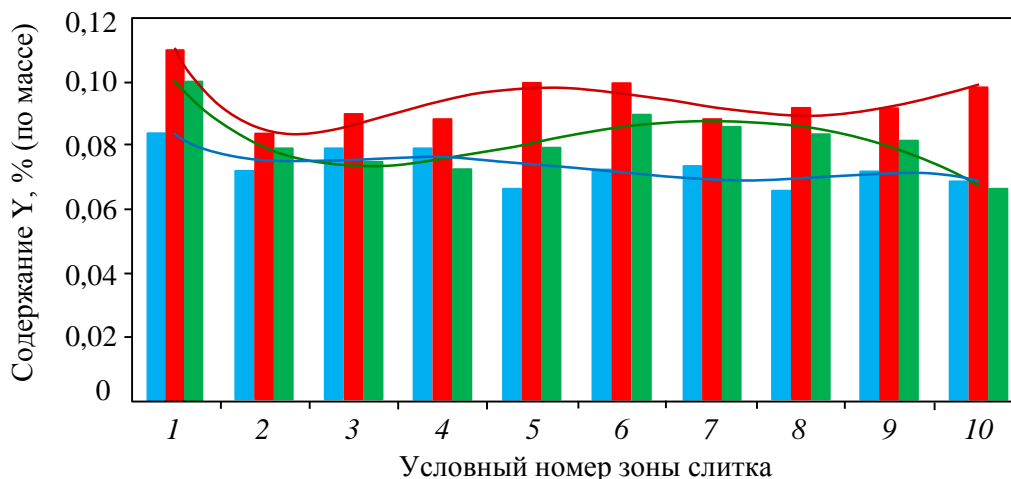


Рисунок 5. Функциональные зависимости и гистограмма распределения иттрия в экспериментальном слитке 1 (зона 1 – центральная область слитка; зона 10 – краевая): ■ – верхняя часть слитка; ■ – серединная часть слитка; ■ – нижняя часть слитка

Анализ гистограммы показал, что в радиальном направлении слитка выраженной закономерности изменения содержания иттрия не наблюдается. Необходимо отметить, что в слитке 1 в целом более обогащена иттрием серединная часть, в слитке 3 – нижняя, что объясняется различиями в режимах выплавки.

### Обсуждение и заключения

На основании приведенных результатов исследования однородности химического состава слитков из высокопрочного псевдо- $\beta$ -титанового сплава, легированного РЗМ, можно сформулировать несколько критериев, которые необходимо учитывать при разработке технологии его выплавки:

- при условии использования в шихтовом наборе опытного сплава только серийно производящихся в промышленности лигатур выбор технологических режимов при вакуумно-дуговом переплаве должен производиться на основе достижения рационального баланса по характеристикам однородности распределения всех легирующих элементов с учетом их количества в сплаве;

- шихтовой набор данного сплава может быть изменен с целью достижения лучшей однородности слитков, что требует изготовления новых лигатур, более близких к титану по своим характеристикам;

- при расчете шихтового состава требуется корректировка содержания иттрия (в сторону его увеличения содержания в шихте), что связано с испарением иттрия или его соединений в процессе плавки и косвенно подтверждается результатами определения его количественного содержания в слитках. Однако для уточнения характера зависимо-

сти остаточного содержания иттрия в слитках от технологических параметров выплавки необходимо проведение дополнительных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В. и др. Технология производства титановых самолетных конструкций. М.: Машиностроение. 1995. 448 с.
2. 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.
3. Панин П.В., Петров А.П., Еремеев В.В., Злыднев М.И., Цветков А.В. Влияние технологических параметров штамповки на структурообразование в стальных элементах бронезащиты //Технология машиностроения. 2013. №9. С. 16–22.
4. Скворцова С.В., Ильин А.А., Бецофен С.Я., Филатов А.А., Дзунович Д.А., Панин П.В. Анизотропия механических свойств и текстура листовых полуфабрикатов из титановых сплавов //Технология легких сплавов. 2006. №1–2. С. 81–87.
5. Ночовная Н.А., Скугорев А.В., Бурханова А.А., Изотова А.Ю. Эффективность применения изотермической деформации при изготовлении штамповок из титановых сплавов //Титан. 2013. №1. С. 31–34.
6. Ночовная Н.А., Скворцова С.В., Анищук Д.В., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Умарова О.З. Отработка технологии опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида  $Ti_2AlNb$  //Титан. 2013. №4(42). С. 33–38.
7. Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Скворцова С.В., Панин П.В., Умарова О.З. Определение технологических параметров деформации опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида  $Ti_2AlNb$  //Титан. 2014. №2 (44). С. 36–41.
8. Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Панин П.В. Исследование структуры и фазового состава опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида  $Ti_2AlNb$  в деформированном состоянии //Титан. 2014. №4 (46). С. 12–17.
9. Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Иванов В.И., Панин П.В., Новак А.В. Исследование влияния алюминия на фазовый состав и термомеханический режим изотермической штамповки интерметаллидного сплава ВТИ-4 //Технология легких сплавов. 2015. №1. С. 57–61.
10. Интерметаллидный сплав на основе титана: пат. №2405849 Рос. Федерация; опубл. 28.10.2009.

11. Zhijun Yang, Hongchao Kou, Fengshou Zhang, Xiangyi Xue, Jinshan Li, Lian Zhou. The Effect of VAR Process Parameters on Beta Flecks Formation in Ti–10V–2Fe–3Al //Proceedings of the 12-th World Conference on Titanium «Ti–2011 Science and Technology». Beijing: Science press. 2012. V. 1. P. 601–604.
12. Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов. М.: Металлургия. 1978. 384 с.
13. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 27–33.
14. Ширяев А.А., Ночовная Н.А., Анташев В.Г., Алексеев Е.Б. Перспективы и особенности применения современных экономнолегированных высокопрочных титановых сплавов //Технология легких сплавов. 2013. №2. С. 29–35.
15. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. М.: ВИЛС–МАТИ. 2009. 520 с.
16. Mina X.H., Emuraa S., Sekidoo N., Nishimuraa T., Tsuchiyaa K., Tsuzaki B.K. Effects of Fe addition on tensile deformation mode and crevice corrosion resistance in Ti–15Mo alloy //Materials Science and Engineering A. 2010. V. 527. P. 2693–2701.
17. Markovsky P.E., Ikeda Masahiko. Balancing of Mechanical Properties of Ti–4,5Fe–7,2Cr–3,0Al Using Thermomechanical Processing and Rapid Heat Treatment //Materials Transactions. 2005. V. 46. №7. P. 1515–1524.
18. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 04 (viam-works.ru).
19. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
20. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Зайцев Д.В., Горюнов А.В. Формирование наноструктурированного состояния в литейном жаропрочном сплаве при микролегировании его лантаном //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 01 (viam-works.ru).
21. Хорев А.И., Ночовная Н.А., Яковлев А.Л. Микролегирование редкоземельными металлами титановых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 206–212.
22. El-Dhaikh Ali, Schmidt Peter, Christ Hans J. Study on Beneficial Effects of Duplex Aging on Microstructure Phenomena Determining the Fatigue life of the Metastable  $\beta$ -titanium

Alloy Ti 38-644 /Proceedings of the 12-th World Conference on Titanium «Ti–2011 Science and Technology». Beijing: Science press. 2012. V. 1. P. 745–749.

23. Ширяев А.А., Анташев В.Г. Особенности разработки высокопрочного самозакаляющегося высокотехнологичного псевдо- $\beta$ -титанового сплава //Авиационные материалы и технологии. 2014. №4. С. 23–30.

#### REFERENSES LIST

1. Bratuhin A.G., Kolachev B.A., Sadkov V.V. i dr. Tehnologija proizvodstva titanovyh samoletnyh konstrukcij [Production technology of titanic aircraft designs]. M.: Mashinostroenie. 1995. 448 s.
2. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitiya materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
3. Panin P.V., Petrov A.P., Ereemeev V.V., Zlydnev M.I., Cvetkov A.V. Vlijanie tehnologicheskikh parametrov shtampovki na strukturoobrazovanie v stal'nyh jelementah bronezashchity [Influence of technological parameters of punching on structurization in steel elements bronezashchity] //Tehnologija mashinostroenija. 2013. №9. С. 16–22.
4. Skvorcova S.V., Il'in A.A., Becofen S.Ja., Filatov A.A., Dzunovich D.A., Panin P.V. Anizotropija mehanicheskikh svojstv i tekstura listovyh polufabrikatov iz titanovyh splavov [Anisotropy of mechanical properties and structure of sheet semi-finished products from titanium alloys] //Tehnologija legkih splavov. 2006. №1–2. С. 81–87.
5. Nochovnajaja N.A., Skugorev A.V., Burhanova A.A., Izotova A.Ju. Jeffektivnost' primeneni-ja izotermicheskoj deformacii pri izgotovlenii shtampovok iz titanovyh splavov [Efficiency of application of isothermal deformation when manufacturing punchings from titanium alloys] //Titan. 2013. №1. С. 31–34.
6. Nochovnajaja N.A., Skvorcova S.V., Anishhuk D.V., Alekseev E.B., Panin P.V., Umarova O.Z. Otrabotka tehnologii opytnogo zharoprochnogo splava na osnove intermetallida  $Ti_2AlNb$  [Working off of technology of pilot hot strength alloy on the basis of  $Ti_2AlNb$  intermetallic compound] //Titan. 2013. №4(42). С. 33–38.
7. Alekseev E.B., Nochovnajaja N.A., Skvorcova S.V., Panin P.V., Umarova O.Z. Opredelenie tehnologicheskikh parametrov deformacii opytnogo zharoprochnogo splava na osnove in-

- termetallida  $Ti_2AlNb$  [Determination of technological parameters of deformation of pilot hot strength alloy on the basis of  $Ti_2AlNb$  intermetallic compound] //Titan. 2014. №2 (44). S. 36–41.
8. Alekseev E.B., Nochovnjaja N.A., Panin P.V. Issledovanie struktury i fazovogo sostava opytnogo zharoprochnogo splava na osnove intermetallida  $Ti_2AlNb$  v deformirovannom sostojanii [Research of structure and phase composition of pilot hot strength alloy on the basis of  $Ti_2AlNb$  intermetallic compound in the deformed condition] //Titan. 2014. №4 (46). S. 12–17.
  9. Alekseev E.B., Nochovnjaja N.A., Ivanov V.I., Panin P.V., Novak A.V. Issledovanie vlijaniya aljuminija na fazovyj sostav i termomechanicheskij rezhim izotermicheskoj shtampovki intermetallidnogo splava VTI-4 [Research of influence of aluminum on phase structure and thermomechanical mode of isothermal punching of intermetallidny alloy VTI-4] //Tehnologija legkih splavov. 2015. №1. S. 57–61.
  10. Intermetallidnyj splav na osnove titana [Intermetallidny titanium-based alloy]: pat. №2405849 Ros. Federacija; opubl. 28.10.2009.
  11. Zhijun Yang, Hongchao Kou, Fengshou Zhang, Xiangyi Xue, Jinshan Li, Lian Zhou. The Effect of VAR Process Parameters on Beta Flecks Formation in Ti–10V–2Fe–3Al /Proceedings of the 12-th World Conference on Titanium «Ti–2011 Science and Technology». Beijing: Science press. 2012. V. 1. P. 601–604.
  12. Titanovye splavy. Plavka i lit'e titanovyh splavov [Titanium alloys. Melting and molding of titanium alloys]. M.: Metallurgija. 1978. 384 s.
  13. Kablov D.E., Panin P.V., Shirjaev A.A., Nochovnjaja N.A. Opyt ispol'zovaniya vakuumnodugovoj pechi ALD VAR L200 dlja vyplavki slitkov zharoprochnyh splavov na osnove aljuminidov titana [Experience of use of the ALD VAR L200 vacuum arc furnace for smelting of ingots of hot strength alloys on the basis of titanium aluminides] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №2. S. 27–33.
  14. Shirjaev A.A., Nochovnjaja N.A., Antashev V.G., Alekseev E.B. Perspektivy i osobennosti primeneniya sovremennyh jekonomnolegirovannyh vysokoprochnyh titanovyh splavov [Perspectives and features of application of modern ekonomnolegirovanny high-strength titanium alloys] //Tehnologija legkih splavov. 2013. №2. S. 29–35.
  15. Il'in A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. Titanovye splavy. Sostav, struktura, svojstva [Titanium alloys. Structure, structure, properties]: Spravochnik. M.: VILS–MATI. 2009. 520 s.

16. Mina X.H., Emuraa S., Sekidoo N., Nishimuraa T., Tsuchiyaa K., Tsuzaki B.K. Effects of Fe addition on tensile deformation mode and crevice corrosion resistance in Ti–15Mo alloy //Materials Science and Engineering A. 2010. V. 527. P. 2693–2701.
17. Markovsky P.E., Ikeda Masahiko. Balancing of Mechanical Properties of Ti–4,5Fe–7,2Cr–3,0Al Using Thermomechanical Processing and Rapid Heat Treatment //Materials Transactions. 2005. V. 46. №7. P. 1515–1524.
18. Horev A.I. Fundamental'nye i prikladnye raboty po konstrukcionnym titanovym splavam i perspektivnye napravlenija ih razvitija [Fundamental and applied works on structural titanium alloys and perspective directions of their development] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 04 (viam-works.ru).
19. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare-earth elements – materials of modern and future high technologies] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
20. Sidorov V.V., Rigin V.E., Zajcev D.V., Gorjunov A.V. Formirovanie nanostrukturirovanogo sostojanija v litejnom zharoprochnom splave pri mikrolegirovanii ego lantanom [Forming of the nanostructured condition in foundry hot strength alloy at microalloying its lanthanum] //Trudy VIAM. 2013. №1. St. 01 (viam-works.ru).
21. Horev A.I., Nochovnaja N.A., Jakovlev A.L. Mikrolegirovanie redkozemel'nymi metallami titanovyh splavov [Microalloying rare earth metals of titanium alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 206–212.
22. El-Dhaikh Ali, Schmidt Peter, Christ Hans J. Study on Beneficial Effects of Duplex Aging on Microstructure Phenomena Determining the Fatigue life of the Metastable  $\beta$ -titanium Alloy Ti 38-644 /Proceedings of the 12-th World Conference on Titanium «Ti–2011 Science and Technology». Beijing: Science press. 2012. V. 1. P. 745–749.
23. Shirjaev A.A., Antashev V.G. Osobennosti razrabotki vysokoprochnogo samozakalivajushhegosja vysokotehnologichnogo psevdo- $\beta$ -titanovogo splava [Features of development high-strength self-tempered hi-tech псевдо- $\beta$ -титанового alloy] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №4. S. 23–30.