

УДК 669.017.165

*Н.А. Ночовная¹, А.С. Кочетков¹, К.А. Боков¹, В.И. Иванов¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЖАРОПРОЧНОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО
ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТИ-4**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-2-2

Определены литейные характеристики интерметаллидного сплава ВТИ-4 применительно к вакуумно-дуговой гарнисажной печи с центробежной заливкой расплава в керамические или металлические формы.

Установлено, что интерметаллидный сплав ВТИ-4 имеет низкие литейные характеристики по сравнению со сплавом VT5Л и интерметаллидным сплавом системы Ti–16Al (% (по массе)): на 40% больше объемную усадку, на 44% меньше жидкотекучесть и на 26–28% меньше заполняемость формы. Полученные литейные характеристики сплава ВТИ-4 могут быть использованы для разработки опытной литейной технологии производства из него деталей.

Полученные литейные характеристики сплава ВТИ-4 могут быть использованы для разработки опытной литейной технологии производства из него деталей по комплексному направлению 7.1. «Интерметаллидные титановые сплавы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1]. Выявлены основные тенденции и перспективы в области разработки новых орто-сплавов и технологий их получения и обработки.

Ключевые слова: орто-сплавы, центробежное литье, плавка, слиток, отливка, керамическая форма, фазовый состав, структура, литейные свойства.

The foundry characteristics of the VTI-4 intermetallic alloy have been determined for a vacuum arc furnace with a centrifugal casting of the melt into ceramic or metallic forms.

It has been found that the VTI-4 intermetallic alloy has low casting characteristics in comparison with the VT5L alloy and Ti–16Al intermetallic alloy (mass. %): 40% more shrinkage, 44% less fluidity and 26–28% less fillability of the mold. The obtained casting characteristics of VTI-4 alloy can be used to develop an experimental foundry technology for the production of parts from it.

The obtained casting characteristics of VTI-4 alloy can be used to develop an experimental foundry technology for the production of parts from it complex direction 7.1. «Intermetallic titanium alloys» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1]. The main trends and prospects in the field of development of new ortho alloys and technologies for their production and processing are revealed.

Keywords: TiAlNb titanium alloys, ingot, spun casting, phase combination, structure, ceramic shape, casting properties.

¹Федеральное 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

Новые силовые установки ГТД для будущих летательных аппаратов предъявляют жесткие требования к конструкционным материалам, которые будут работать в условиях высоких нагрузок в агрессивной газовой среде в течение заданного ресурса [1].

Для этих целей наиболее перспективны деформируемые интерметаллидные

титановые сплавы на основе соединения Ti_2AlNb – так называемые орто-сплавы, которые по своим удельным прочностным и жаропрочным свойствам, технологичности и стойкости к возникновению пожара превосходят серийные титановые сплавы [2–5].

Однако сплавы на основе интерметаллида Ti_2AlNb имеют ряд особенностей при производстве слитков на существующем металлургическом оборудовании, которые связаны с большим содержанием легирующих элементов с различающимися температурами плавления и сложностями при изготовлении расходных электродов, что требует разработки технологии, обеспечивающей однородное распределение легирующих элементов в слитках.

В настоящее время в опытно-промышленном производстве используются оптимизированные технологии производства крупногабаритных слитков с однородным распределением легирующих элементов. В работах [6–8] проведены исследования по технологиям выплавки слитков орто-сплавов различными методами.

Несмотря на то, что орто-сплавы предназначены для получения деформированных полуфабрикатов, из этих сплавов можно изготавливать детали, которые невозможно изготовить с помощью операций горячей деформации. Как показывает практика, детали сложной формы целесообразно изготавливать методом литья по выплавляемым моделям в керамические или графитовые формы в вакуумных гарнисажных печах. Поскольку литейная технология наиболее экономичный процесс, она может снизить трудоемкость изготовления таких деталей и обеспечить при некотором снижении низкотемпературных характеристик (σ_b , δ , ψ) повышенную жаропрочность (σ'_{100}) при рабочих температурах [9].

Материалы, оборудование и методы исследования

В работе использовали интерметаллидный титановый сплав ВТИ-4, основа которого – интерметаллид Ti_2AlNb (орто-фаза), дополнительно легированный цирконием, ванадием, молибденом и кремнием. Для выплавки сплавов использовали серийные шихтовые материалы – титановую губку (марки ТГ90 и ТГ100), лигатуру ниобий-алюминий-кремний (марка АНК), лигатуру алюминий-молибден-титан (марка АМТ), металлические цирконий (марка ЦрИ) и ванадий (марка Вн-М). Из подготовленных шихтовых материалов изготавливали расходные электроды, которые переплавляли в слитки многократным вакуумно-дуговым переплавом (ВДП) [10].

Исследования литейных характеристик, макро- и микроструктуры модельных отливок из сплава ВТИ-4 включали:

- выплавку слитков в виде заготовок из сплава ВТИ-4 с помощью способа ВДП;
- отливку образцов в вакуумно-дуговой гарнисажной печи ВДЛ-5 с центробежной заливкой металла в формы;
- определение жидкотекучести;
- определение линейной и объемной усадок;
- определение температурного интервала кристаллизации и заполняемости формы по пробе Чикеля;
- определение температурного интервала кристаллизации способом вакуумного плавления;
- исследование литейных дефектов рентгеновской дефектоскопией;
- горячее изостатическое прессование (ГИП) литых заготовок на установке Quintus-16;
- исследование макро- и микроструктуры литых темплетов с использованием приборов оптической микроскопии.

Результаты экспериментов

Изготовление слитков из сплава ВТИ-4

Для проведения работы изготовлены слитки из сплава ВТИ-4 \varnothing 150 мм и массой по 30 кг, которые выплавляли с четырьмя вакуумно-дуговыми переплавами [11]. Химический состав изготовленных слитков представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав слитков из сплава ВТИ-4

Место отбора проб слитка		Химический состав*, % (по массе)					
		Al	Nb	Zr	Mo	V	Si
Верх	Центр	11,5/11,7	39,4/40,1	1,2/1,4	0,6/0,7	1,3/1,4	0,14/0,16
	0,5 радиуса	11,8/12,0	39,1/40,2	1,1/1,2	0,6/0,7	1,2/1,2	0,15/0,14
Образующая	Верх	11,6/11,8	39,6/40,1	1,2/1,3	0,59/0,6	1,2/1,3	0,14/0,13
	Середина	11,4/11,8	39,5/40,1	1,2/1,3	0,61/0,6	1,25/1,3	0,14/0,15
	Низ	11,5/11,6	39,7/40,2	1,1/1,2	0,62/0,7	1,2/1,25	0,15/0,16

* В числителе и знаменателе приведены содержания элементов для 1-го и 2-го слитков соответственно.

Из представленных результатов видно, что изготовленные слитки из сплава ВТИ-4 имеют достаточно однородное распределение легирующих элементов.

Определение литейных характеристик

Как показала литейная практика титановых сплавов, получение качественных отливок сложной формы зависит от жидкотекучести сплава, которая определяет заполняемость литейной формы [12].

Параметры жидкотекучести сплавов в основном определяются:

- физическими свойствами сплава – температурой плавления, поверхностным натяжением расплава, интервалом кристаллизации, теплопроводностью сплава и др.;
- свойствами материала литейных форм, геометрическими размерами форм, конструкцией и размерами литников, способами заливки металла и др.

Для получения литых заготовок из сплава ВТИ-4 использовали гарнисажную плавку слитков четырехкратного переплава в вакуумно-дуговой печи. Перед плавками в тигле гарнисажной печи наводили гарнисаж из модельного сплава системы Ti–12Al–40Nb (% (по массе)) толщиной 35–45 мм. Процесс получения отливок заготовок включал: приварку слитка к державке и центровку слитка в тигле, откачку печи до вакуума с остаточным давлением 0,133 Па, плавку слитка электрической дугой.

Заливку жидкого сплава ВТИ-4 проводили центробежным методом, который обеспечивал получение отливок с меньшими литейными дефектами. Полученные отливки охлаждали в вакууме в течение 90 мин. Охлажденные отливки отрезали от центрального стояка и передавали на пескоструйную обработку для очистки отливок от остатков формы.

Оценку жидкотекучести сплава ВТИ-4 проводили на спиральной пробе треугольного сечения, показанной на рис. 1. Для оценки характеристики отливали 5 проб и вычисляли среднее значение длины залитой спирали. Разброс данных по длине залитой пробы не превышал 3%.



Рис. 1. Графитовая форма для определения жидкотекучести в разобранном виде

Линейную усадку сплава ВТИ-4 определяли при помощи специальных образцов, заливаемых в стальной кокиль. Внутренняя полость кокиля длиной 296 мм, предназначенная под заливку образца, имела круглое сечение $\varnothing 20$ мм с таким условием, что металл при охлаждении имеет свободную усадку как по диаметру, так и по длине образца. После охлаждения образец вынимали из кокиля и измеряли его длину. Внешний вид образца для определения линейной усадки показан на рис. 2. Для получения достоверных значений линейной усадки отливали по 5 образцов сплава и подсчитывали ее среднее значение.

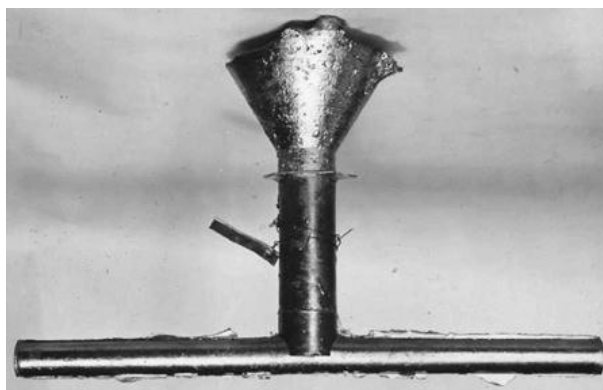


Рис. 2. Внешний вид образца для определения линейной усадки

Объемную усадку сплава ВТИ-4 определяли по разности объемов шаров, залитых в стальной кокиль, и внутренней полости стального кокиля, оформляющей шар.

Для получения концентрированной усадочной раковины в центре шара, которую легко измерить при разрезке шара по наибольшему диаметру, использовали малое сечение питателя. Это сделано для того, чтобы во время кристаллизации он не мог питать жидким металлом залитый шар, так как после заливки питатель быстро застывает и не питает отливку. Замер объема залитой шаровой пробы проводили методом гидростатического взвешивания путем погружения пробы в воду с последующим вычетом объема усадочной раковины. Результаты определения объемной усадки сплава ВТИ-4 приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Литейные свойства титановых сплавов ВТ5Л, интерметаллидных
Ti-16Al (% (по массе)) и ВТИ-4**

Свойства	Значения свойств для сплава		
	титанового ВТ5Л*	интерметаллидного	
		Ti-16Al*	ВТИ-4
Температура плавления, °С	1650	1650	1810
Интервал кристаллизации, °С	35	30	50
Объемная усадка, %	3,0–3,2	4,0–4,5	4,5–5,4
Линейная усадка, %	1,0–1,2	1,3–2,5	1,5–1,8
Жидкотекучесть, мм	500	480	240–280
Проба на заполняемость, мм:			
канал \varnothing 5 мм	140	120	100
канал \varnothing 7,5 мм	190	160	140

* Справочные данные [9].

Определение температурного интервала кристаллизации проводили методом вакуумного плавления в переменном температурном поле по схеме, представленной на рис. 3 [13]. Видно, что нижний конец образца находился в самой горячей зоне нагрева, поэтому этот участок быстрее нагревался и на конце образца появлялась капля жидкого металла, которая и определяла температуру ликвидус сплава. Границу температуры солидус сплава определяли по появлению жидкости в виде отдельных капель на границе зерен. Используя график распределения температурного поля по образцу, определяли температуры солидус и ликвидус сплава.

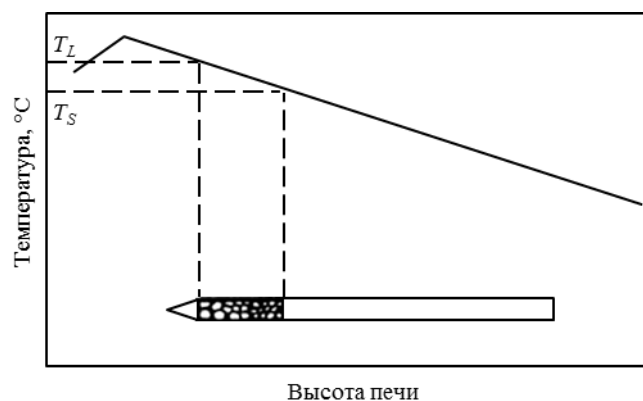


Рис. 3. Схема определения температурного интервала кристаллизации методом вакуумного плавления (T_S , T_L – температура солидус и ликвидус соответственно)

Для получения достоверных параметров проводили 5–8 определений и рассчитывали среднее значение. Разброс значений не превышал 6–8%. Результаты определения интервала кристаллизации для сплава ВТИ-4 представлены в табл. 2. Следует отметить, что, несмотря на простоту этого метода, полученные данные по температурам ликвидус и солидус для сплава ВТИ-4 являются приближенными, поскольку в экспериментах не учитывали силы поверхностного натяжения расплава, влияющие на формирование и отрыв капли [14].

Изучение заполняемости форм сплавом ВТИ-4 проводили с помощью электрокорундовых форм, изготовленных по выплавляемым моделям, прессованных графитовых форм и металлического кокиля. Пробы на заполняемость (рис. 4) имели несколько каналов разного сечения длиной ~200 мм. Погрешность по сечению канала не превышала $\pm 0,1$ мм. Такой размер канала определялся размерами отдельных частей отливки,

куда можно подвести питатели для жидкого металла. В большинстве отливок расстояния от питателя до конечной точки литой заготовки не превышали 200 мм.

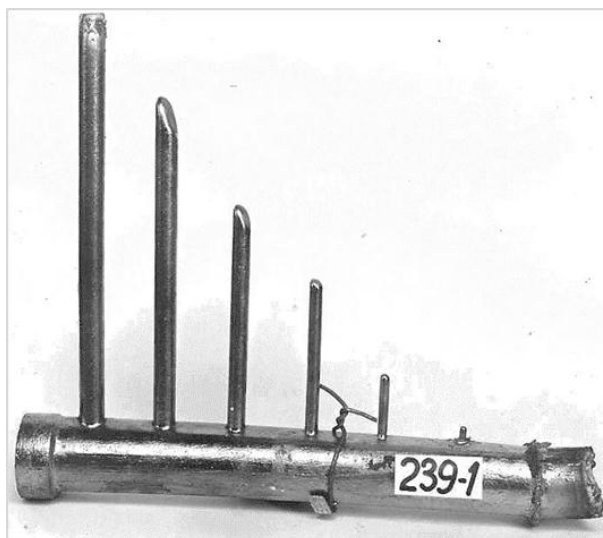


Рис. 4. Проба на заполняемость формы

При центробежной заливке образцы на заполняемость располагали на одинаковом расстоянии от оси вращения, равном 200 мм, поэтому давление, оказываемое на металл, для всех образцов было определенным и имело следующее значение: 2,22 МПа – для 100 об/мин, 8,88 МПа – для 200 об/мин. Результаты исследования центробежной заливки на заполняемость форм титановым сплавом ВТ5Л, интерметаллидными сплавами ВТИ-4 и системы Ti–16Al (% (по массе)) приведены в табл. 2.

Из полученных данных видно, что сплав ВТИ-4 имеет более низкие литейные характеристики – на 40% больше объемную усадку, на 44% меньше жидкотекучесть и на 26–28% меньше заполняемость формы по сравнению серийным сплавом ВТ5Л. Интерметаллидный сплав системы Ti–16Al (% (по массе)) по своим литейным характеристикам занимает промежуточное положение. Отмеченные недостатки литейных свойств сплава ВТИ-4 [15, 16] связаны с рядом факторов – повышенной температурой плавления (на 150°C больше, чем у Ti), широким интервалом кристаллизации (более 20°C) и высоким поверхностным натяжением расплава, который содержит элементы с высоким поверхностным натяжением:

Элемент	Ti	Nb	Mo	Zr
Поверхностное натяжение, МН/м	1390	2150	1915	1400

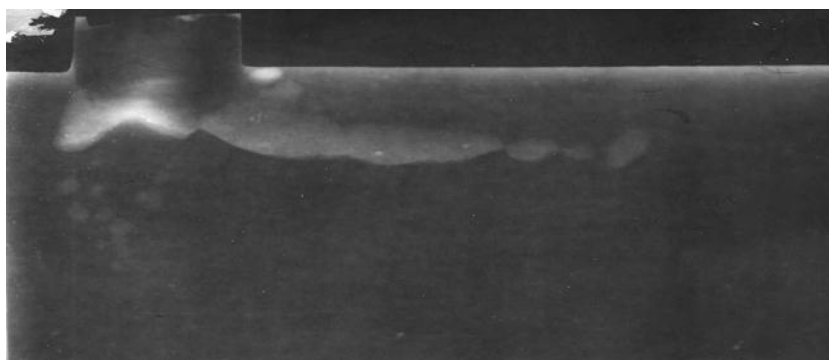


Рис. 5. Дефектограмма отливки в виде плиты толщиной 40 мм из сплава ВТИ-4

Для оценки качества отливок образцов проводили рентгеновскую дефектоскопию – выявлены типичные дефекты литья: усадочная раковина и сосредоточенная пористость, которые показаны на рис. 5.

Исследование макро- и микроструктуры литых образцов

Исследование макроструктуры отливок проводили на темплетях, вырезанных в продольном направлении отливок. Макроструктура отливок в толстых и тонких сечениях показана на рис. 6. Размер макрозерна в сечении 40 мм составлял 1500–2500 мкм, а в сечении 10 мм изменялся от 500 до 1000 мкм.

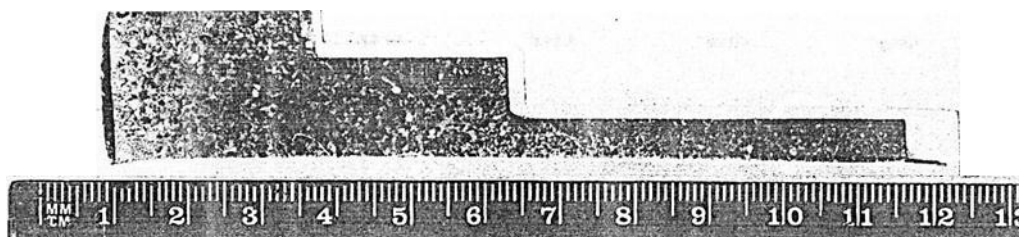


Рис. 6. Макроструктура ($\times 1$) ступенчатой отливки из сплава ВТИ-4

Исследование микроструктуры литых образцов проводили на оптическом микроскопе при увеличении $\times 500$. Исходная микроструктура литого образца сечением 10 мм показана на рис. 7. Литая микроструктура в этом сечении представлена крупным β -зерном размерами 500–1000 мкм и тонкими сферическими выделениями внутри зерна. Определить точный размер этих выделений не представляется возможным, поскольку структура является закаленной (приблизительная скорость охлаждения данного участка составляла $300^\circ\text{C}/\text{с}$) и не обеспечивает точных замеров элементов структуры. Ориентировочно размеры этих выделений составляли 1–5 мкм.

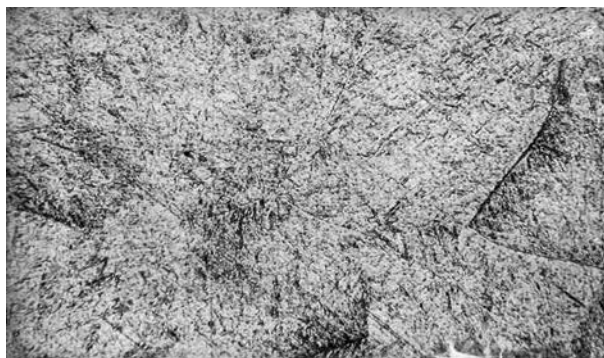


Рис. 7. Микроструктура ($\times 500$) литого исходного материала

Для устранения микропор и поверхностных дефектов литые заготовки из серийных и интерметаллидных титановых сплавов подвергают горячему изостатическому прессованию (ГИП) при температурах ниже температуры полиморфного превращения ($T_{\text{п.п}}$). Операцию ГИП литых заготовок из сплава ВТИ-4 проводили на установке Quintus-16. Типичная микроструктура материала представлена на рис. 8. Видно, что в образцах после ГИП не обнаруживается микропористость, но сохраняется усадочная раковина и сосредоточенная пористость. После обработки ГИП размеры первичного β -зерна не изменяются, однако отмечено увеличение размеров внутризеренных выделений – до 5–10 мкм, которые имеют в основном сферическую форму. Такое изменение

микроструктуры объясняется тем, что ГИП сплава ВТИ-4 проводили в трехфазной β +орто+ α_2 -области, а температура однофазной области, при которой резко вырастает зерно, составляет 1125°C [17].



Рис. 8. Микроструктура ($\times 500$) литой заготовки сечением 10 мм после ГИП

Исследование литейных характеристик сплава ВТИ-4 показало, что для получения литых заготовок и деталей можно использовать существующие технологии гарнисажной плавки и плавильное оборудование – дуговые печи ОКБ 833Д, которые обеспечивают перегрев расплава на 100–150°C выше температуры ликвидус.

Для сохранения температуры расплава и улучшения жидкотекучести при заливке металла в формы, литниковые системы питателей должны иметь на 25–30% увеличенные площади сечений.

При получении тонкостенных отливок целесообразно использовать центробежную заливку форм, обеспечивающую за счет гравитационного эффекта лучшее заполнение их жидким металлом. При оптимальных параметрах центробежной заливки (расстояние от оси вращения и оптимальное число оборотов) влияние материала формы на ее заполняемость будет уменьшаться.

В качестве кардинальных мер по получению качественных отливок из интерметаллидных титановых сплавов наряду с центробежной заливкой целесообразно использовать подогреваемые литейные формы, которые сохраняют жидкотекучесть сплавов, обеспечат лучшее их заполнение и позволят снизить термические напряжения, возникающие при охлаждении отливок.

Заключения

Определены литейные характеристики интерметаллидного сплава ВТИ-4 применительно к вакуумно-дуговой гарнисажной печи с центробежной заливкой расплава в керамические или металлические формы.

Установлено, что интерметаллидный сплав ВТИ-4 имеет низкие литейные характеристики по сравнению со сплавом ВТ5Л: на 40% больше объемную усадку, на 44% меньше жидкотекучесть и на 26–28% меньше заполняемость формы.

Для получения качественных отливок из сплава ВТИ-4 необходимо использовать оборудование, допускающее перегрев расплава на 100–150°C выше температуры ликвидус, а также использовать подогреваемые керамические литейные формы, в которых обеспечивается высокая заполняемость и устраняются термические напряжения при охлаждении отливок.

Полученные литейные характеристики сплава ВТИ-4 могут быть использованы для разработки опытной литейной технологии производства из него деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. матер. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
3. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // *Наука и жизнь*. 2010. №4. С. 2–7.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.03.2017).
5. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
6. Хорев А.И., Ночовная Н.А., Яковлев А.Л. Микролегирование редкоземельными металлами титановых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 206–212.
7. Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Боков К.А. Экономнолегированные титановые сплавы для слоистых металлополимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №11. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-2-2.
8. 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 (31). С. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
9. Скворцова С.В., Филатов А.А., Дзунович Д.А., Панин П.В. Влияние содержания алюминия на деформируемость титановых сплавов при нормальной температуре // *Технология легких сплавов*. 2008. №3. С. 40–45.
10. Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Боков К.А. Современные экономнолегированные титановые сплавы: применение и перспективы развития // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2016. №9 (735). С. 8–15.
11. Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б., Ясинский К.К., Кочетков А.С. Специфика плавки и способы получения слитков интерметаллидных титановых сплавов с повышенным содержанием ниобия // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 53–59.
12. Ночовная Н.А., Скворцова С.В., Анищук Д.С., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Умарова О.З. Обработка технологии опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ti_2AlNb // *Титан*. 2013. №4 (42). С. 33–38.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Панин П.В., Новак А.В. Технологическая пластичность, структура и фазовый состав опытного титанового орто-сплава, содержащего 13% (по массе) алюминия // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №12. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.03.2017).
17. Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Новак А.В. Исследование закономерностей формирования структурно-фазового состояния сплавов на основе орто- и гамма-алюминидов титана в процессе термомеханической обработки // *Вестник РФФИ*. 2015. №1 (85). С. 18–26.