

## МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

---

---

УДК 669.295:621.74.002.6

### ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИТЬЯ НА КАЧЕСТВО ФАСОННЫХ ОТЛИВОК ИЗ НОВОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ TiAl

**Антипов В.В., Ночовная Н.А., Кочетков А.С., Панин П.В.\* , Дзунович Д.А.**

*Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,  
Государственный научный центр Российской Федерации,  
ВИАМ, ул. Радио, 17, Москва, 105005, Россия  
\* e-mail: PaninPaV@yandex.ru*

---

Приведены результаты оригинальных исследований литой структуры и свойств нового жаропрочного интерметаллидного гамма-сплава Ti-45,5Al-2V-1Nb-1,5Zr(Cr)-Gd-B, разработанного в ВИАМ. Исследовано влияние температурно-временных параметров центробежного литья в двухкамерной индукционной печи с холодным тиглем ALD Leicomelt 5 на макро- и микроструктуру фасонных отливок. Показано, что определяющее влияние на структурную однородность получаемых отливок оказывает температура предварительного подогрева литейных форм. На основании полученных результатов разработаны технологии литья и термической обработки, позволяющие получать бездефектные фасонные отливки лопаток турбин низкого давления авиационных двигателей.

*Ключевые слова:* интерметаллиды, алюминид титана TiAl, гамма-сплав, центробежное литье, фасонные отливки, микроструктура отливок, лопатки турбины.

---

#### **Введение**

Еще в 1999 году Д. Димидук опубликовал результаты сравнительного анализа физико-механических характеристик сплавов на основе эквиатомного алюминид титана  $\gamma$ -TiAl (гамма-сплавов) с другими металлическими материалами авиационного назначения (стали, а также сплавы на основе Ni, Mg, Al, Be, Mo и др.) [1]. В статье [1] убедительно показана перспективность гамма-сплавов не только с точки зрения научно-исследовательского интереса, но и с точки зрения практического применения в качестве жаропрочных материалов для

авиационных изделий ответственного назначения. С этого момента интерес исследователей и конструкторов новой техники к гамма-сплавам значительно вырос, что нашло отражение также в разработанных в ВИАМ «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [2–4], где одним из 18 направлений является развитие интерметаллидных материалов, в первую очередь жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов системы «титан-алюминий» [5–7] и «титан-алюминий-ниобий» [6–8].

Работы по созданию жаропрочных сплавов на основе интерметаллида TiAl и технологий их производства и обработки активно проводятся во всех ведущих странах мира [7, 9–17]: США (General Electric, Pratt&Whitney, Howmet), Германии (GKSS Research Center, GfE, ACCESS), Франции (PCC, Alstom), Великобритании (IRC-Birmingham, Rolls-Royce), Швейцарии и Швеции (Asea Brown Boveri), Австрии (Plansee), КНР (вузы и научно-исследовательские институты), Японии (Mitsubishi Heavy Industries, Honda Motor, Nippon Steel). В России в области создания и апробации жаропрочных титановых сплавов, в том числе на основе алюминидов титана [7, 17–23], работают следующие ведущие организации и вузы: ВИАМ, ИПСМ РАН, ИС-МАН РАН, УМПО, НИУ МИСиС, НИУ МАИ, НИУ БелГУ и др.

На протяжении всего периода развития гамма-сплавов, т. е. последние 20–30 лет, а также и в настоящее время основные усилия исследователей сосредоточены на повышении их низкотемпературной пластичности и рабочих температур (температур хрупко-вязкого перехода) [7, 10, 21]. Кроме того, интенсивно разрабатываются литейные, деформационные, порошковые и аддитивные технологии. Отдельное внимание уделяется контролю морфологии и термической стабильности структуры [7, 10, 11, 24] как на стадиях производственного цикла, так и в процессе эксплуатации сплавов в виде элементов конструкций (в основном — деталей двигателей внутреннего сгорания, газотурбинных двигателей и наземных энергетических установок).

К настоящему времени существует несколько композиций гамма-сплавов, разработанных отечественными исследователями и имеющих перспективы практического применения [25–28]. Исследования, проведенные в данной статье, имеют прикладной характер и направлены на отработку технологии фасонного литья отливок из нового жаропрочного гамма-сплава, разработанного в ВИАМ и содержащего редкоземельные элементы (РЗЭ) [7, 25, 29].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 7.1 «Интерметаллидные сплавы на основе титана» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [2, 3].

### Материалы и методы исследования

Исследования проведены на интерметаллидном сплаве марки ВИТ7Л, разработанном в ВИАМ, следующего запатентованного состава (ат.%): Ti-46Al-2V-1Nb-1,5Zr(Cr)-Gd-B [25].

Заготовительную выплавку слитков массой ~30 кг для последующего литья проводили методом многократного вакуумно-дугового переплава с расходуемым электродом в печи ALD VAR L200 (рис. 1) по технологии, описанной в [30].

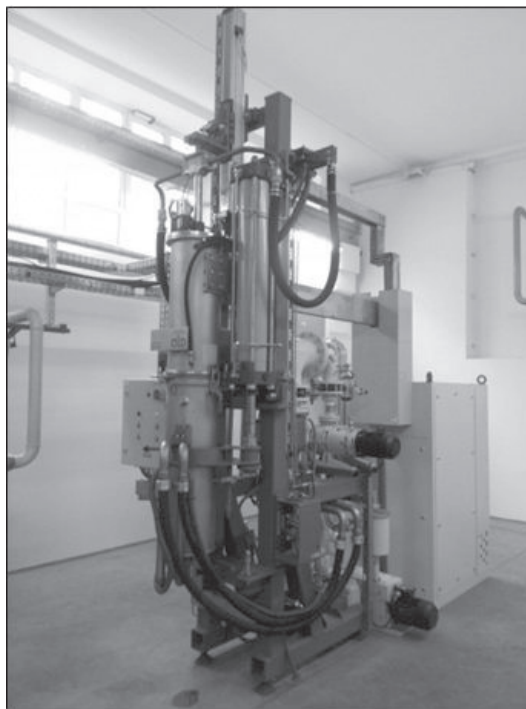


Рис. 1. Внешний вид вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200

В качестве шихтовых материалов для выплавки слитков использовали: титан губчатый ТГ90/100, высокочистый алюминий А99, ванадий металлический ВнМ-1, цирконий иодидный ЦрИ, хром электролитический ЭРХ-1, гадолиний металлический ГдМ-1, бор-порошок, а также лигатуры ВнАл-1 и НТ47. Расходуемые электроды Ø 100 мм готовили на вертикальном прессе П454 с усилием 160 тс методом прессования шихтовой смеси через конусную матрицу. После изготовления прессованные электроды выдерживали в сушильном шкафу при температуре 120–150°C не более 8 ч до начала плавки [31]. Электродами для второго и последующих переплавов служили слитки предыдущего переплава.

Отливки получали методом литья по выплавляемым моделям на вакуумно-индукционной плавильно-заливочной установке с холодным тиглем ALD Leicomelt 5 (рис. 2).

Структуру и фазовый состав слитков исследовали методами оптической микроскопии (инвертированный металлографический микроскоп Olympus GX51, программный комплекс для анализа изображений SIAMS-700) и рентгеноструктурного анализа (дифрактометр Bruker D8 ADVANCE). Подготовку микрошлифов осуществляли по стандартным методикам. Анализ химического состава проводили

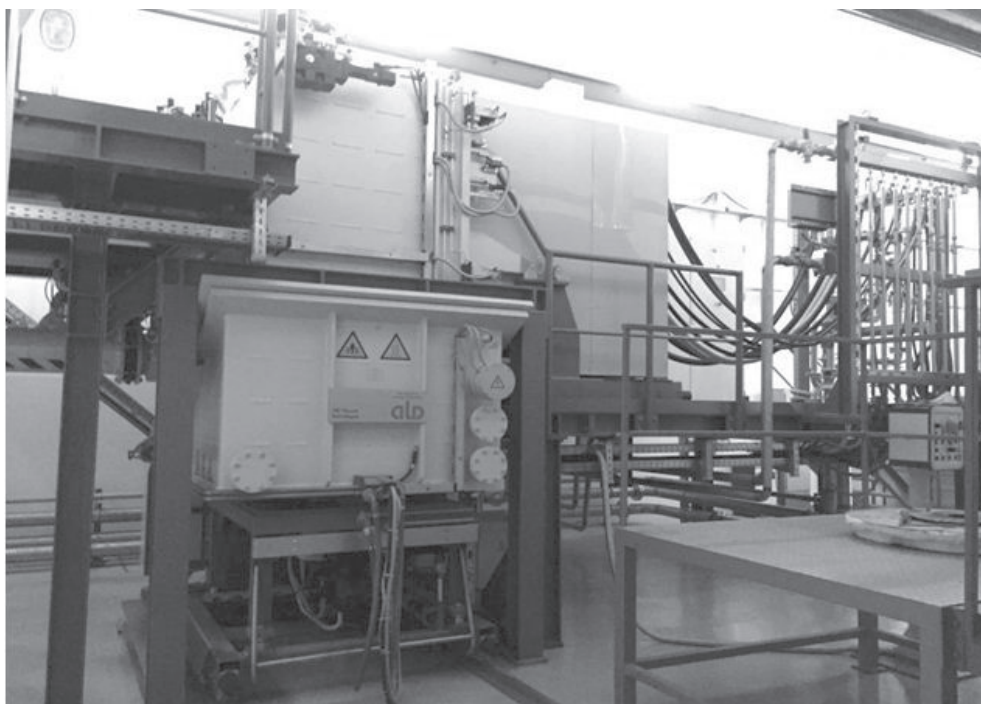


Рис. 2. Внешний вид плавильно-заливочной установки ALD Leicomelt 5

ли рентгенофлуоресцентным (спектрометр Bruker S4 Explorer) и микрорентгеноспектральным (анализатор Jeol JCMA-733) методами.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

В плавильно-заливочных установках, применяемых для получения отливок из титановых сплавов, совмещены два процесса — приготовление расплава и заливка расплава в литейную форму [7].

Плавильно-заливочная установка Leicomelt 5 представляет собой двухкамерную печь (с вертикальным расположением камер): верхняя вакуумная камера для приготовления расплава путем плавки исходных слитков в индукционном водоохлаждаемом тигле отделена вакуумным затвором от нижней вакуумной камеры, где происходит заливка расплава в литейную форму, установленную на столе центробежной машины. Такая компоновка печи обеспечивает существенное преимущество как по числу циклов производства (возможность раздельного вакуумирования камер печи), так и по обеспечению контролируемых параметров кристаллизации и скорости охлаждения подогреваемого контейнера с литейными формами, что является принципиально важным для интерметаллидных титановых гамма-сплавов, поскольку позволяет регулировать на стадии кристаллизации параметры структурных составляющих и получать мелкозернистую структуру, обеспечивающую высокую технологичность и жаропрочные свойства.

Для получения отливок из интерметаллидных сплавов в вакуумных плавильно-заливочных уста-

новках применяют способы литья, обеспечивающие быстрое заполнение формы расплавом и создание повышенного давления в металле. Это связано с высокими интенсивностью охлаждения жидкого титана и скоростью его затвердевания, а также с большими газовыми потоками, образующимися в процессе формирования отливки. Таким требованиям удовлетворяет центробежное литье с вертикальной осью вращения стола центробежной машины.

С помощью программного обеспечения ProCast была разработана конструкция литниково-питающей системы (ЛПС) с учетом центробежной заливки металла.

По результатам компьютерного моделирования установлено, что разработанная конструкция ЛПС обеспечивает полное заполнение литейной формы металлом и питание отливок в процессе кристаллизации, отсутствие металлургических дефектов на отливках сегмента лопатки (пор, несплошностей, рыхлот, незаливов), связанных с заливкой металла.

С целью определения температуры заливки интерметаллидного титанового гамма-сплава был определен температурный интервал кристаллизации в литом состоянии:

- температура солидус сплава: 1471°C;
- температура ликвидус сплава: 1528°C.

По результатам проведенных экспериментальных заливок отливок рабочих лопаток было установлено, что на лопатках наблюдаются частичные незаливов входных кромок пера, кромок бандажных

полок и неполное заполнение прибылей, питающих бандажную полку. Также произошел отрыв бандажных полок в районе радиуса перехода вследствие возникновения горячих трещин, по фронту распространения которых наблюдается пористость.

Для получения полных сведений о качестве отливок проведены исследования макро- и микро-структуры.

Металлографический анализ показал, что макро-структура центральной части пера отливок рабочих лопаток соответствует 3-му баллу по 10-балльной шкале макро-структур титановых сплавов в соответствии с ПИ 1.2.785. Макро-структура входной и выходной кромок соответствует 2-му баллу.

В целях получения данных по локальному химическому составу был выполнен микрорентгено-спектральный анализ образцов отливок рабочих лопаток, по результатам которого установлено, что матрица образцов представляет собой чередующиеся пластины  $\gamma$ - и  $\alpha_2$ -фаз (рис. 3). Имеются зоны, содержащие пониженное относительно матрицы количество алюминия и повышенное количество ванадия и циркония/хрома. Обнаружены избыточные фазы, обогащенные гадолинием и кислородом (сложные оксиды гадолиния).

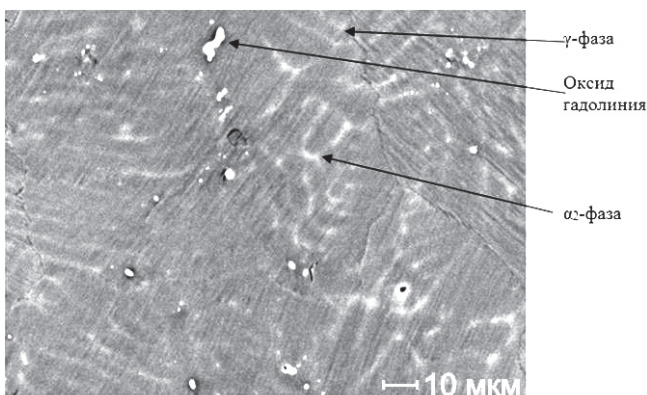


Рис. 3. Микро-структура образца из интерметаллидного титанового гамма-сплава

Для оценки вероятности возникновения горячих трещин было проведено дополнительное математическое моделирование. Результаты моделирования показали, что горячие трещины возникают из-за формирования обширной двухфазной зоны с низким содержанием жидкой фазы (0,1–0,15 об. %). При возникновении растягивающих напряжений происходит разрыв дендритного каркаса, который не обладает достаточной прочностью. Поскольку жидкой фазы недостаточно, а каналы, по которым она могла бы протечь к трещине и «залечить» ее, уже фактически перекрыты, формируется дефект,

который называют *горячей трещиной*. Эта версия подтверждается при инструментальных исследованиях показателей микро-структуры, в частности — расстояния между вторичными осями дендритов, которое было приближенно вычислено для разных режимов нагрева формы (рис. 4). При более низкой температуре предварительного подогрева формы ( $T_{\phi} = 500^{\circ}\text{C}$ ) структура в критической области (перо вблизи бандажной полки) более мелкая, т. е. возможность «залечивания» трещины отсутствует. При более высокой температуре ( $T_{\phi} = 800^{\circ}\text{C}$ ) расстояние между осями дендритов больше и появляется возможность «залечивания» трещины.

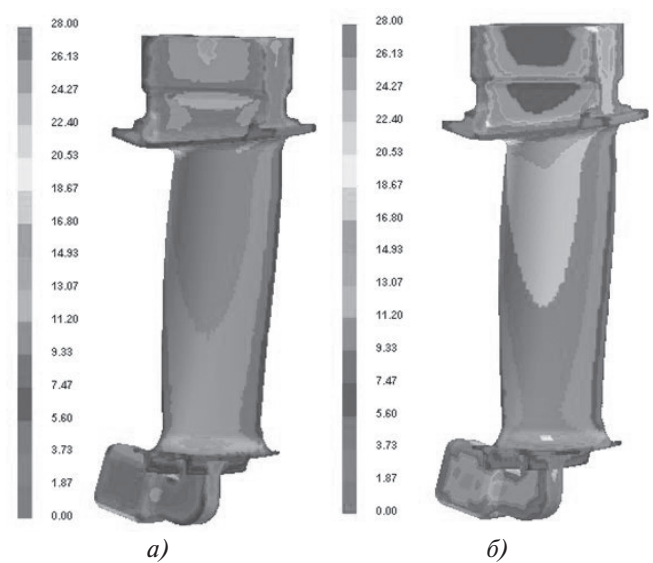


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования расстояния между вторичными осями дендритов (мкм) при разных температурах нагрева формы  $T_{\phi}$ : а —  $500^{\circ}\text{C}$ ; б —  $800^{\circ}\text{C}$

Сделанные выводы косвенно подтверждает критерий склонности к образованию горячих трещин, рассчитанный в процессе компьютерного моделирования технологии заливки. Критерий носит условный характер и может использоваться только для сравнения разных вариантов. В данном случае он подтверждает, что повышение температуры формы снижает риск образования горячих трещин.

Экспериментально было установлено, что при температурах нагрева формы  $900^{\circ}\text{C}$  и выше происходит взаимодействие расплава с материалом формы, что в конечном итоге приводит к возникновению эрозионно-подобных поверхностных дефектов отливок, а также незаливов.

В то же время технологические свойства расплава, в первую очередь жидкотекучесть, значительно ухудшаются если температура формы ниже  $750^{\circ}\text{C}$ : на отливках присутствуют множественные дефекты в виде незаливов.

Проведенные исследования показали, что для гамма-сплава выбранного состава наиболее оптимальной температурой нагрева литейной формы является интервал 750—850 °С. Визуальный осмотр полученных отливок показал значительное уменьшение взаимодействия расплава с материалом формы. При этом снижение температуры не повлияло на заполняемость формы: на отливках отсутствуют горячие трещины и незаливывы (рис. 5, *а*). После проведения визуального контроля партия отливок рабочих лопаток прошла неразрушающий контроль рентгенографическим методом (рис. 5, *б*).

Для оценки влияния температуры нагрева форм на структуру отливок лопаток из нового интерметаллидного титанового гамма-сплава были проведены исследования макроструктуры в различных сечениях отливок рабочих лопаток, полученных при температурах нагрева форм 1000, 900 и 800 °С (рис. 6).

Установлено, что снижение температуры нагрева форм до 800 °С изменяет характер макроструктуры. Отливки, полученные при температурах форм 1000 и 900 °С, в различных сечениях обладают типичной литой структурой с мелким первичным зерном по периметру отливок и крупными столбчатыми кристаллами в сердцевине. Отливки, полу-

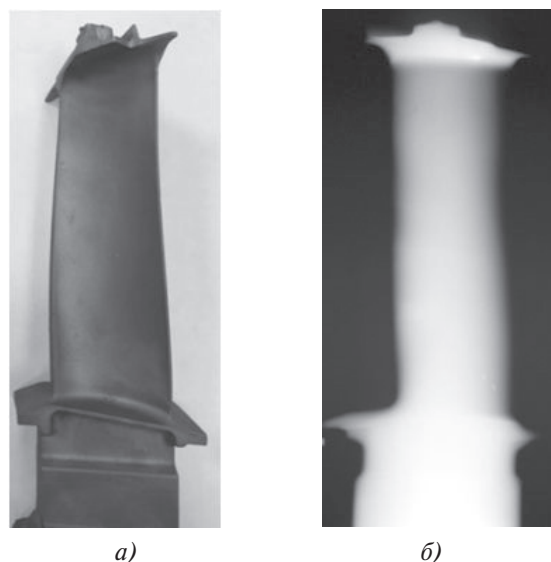


Рис. 5. Отливки рабочих лопаток из интерметаллидного титанового гамма-сплава: *а* — внешний вид отливок; *б* — снимок рентгенографического контроля

ченные при температуре формы 800 °С, в разных сечениях имеют структуру, представленную равноосными макрозернами, размер которых зависит от толщины сечения отливки. Формирование равноосных зерен в отливках, полученных при температуре формы 800 °С, обусловлено увеличением сте-

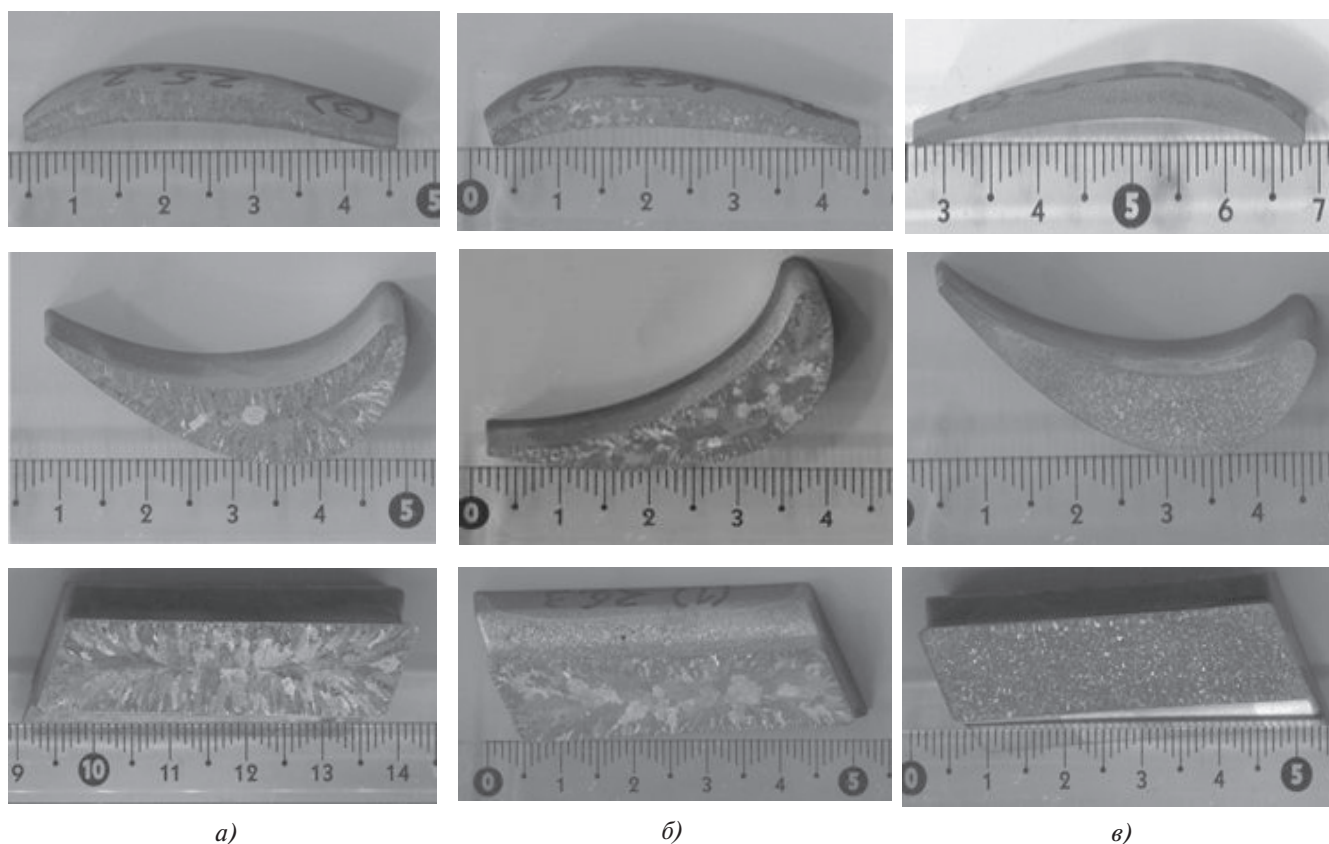


Рис. 6. Макроструктура в различных сечениях отливок рабочих лопаток (вверху — верхняя часть пера, в середине — центральная часть, внизу — замковая часть), полученных при разных температурах нагрева формы  $T_{\text{ф}}$ : *а* — 1000 °С; *б* — 900 °С; *в* — 800 °С

пени переохлаждения и, как следствие, ростом числа центров кристаллизации. Данная структура наиболее предпочтительна с точки зрения механических и эксплуатационных свойств конечного изделия.

Для достижения необходимых значений механических характеристик на образцах из нового интерметаллидного титанового гамма-сплава, а также для возможности устранения металлургических дефектов в материале отливки применяется технологический процесс термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием (ГИП). Целью ГИП отливок рабочих лопаток является устранение в структуре материала микропористости и рыхлоты.

С помощью циклической термической обработки формируется тонкопластинчатая структура, которая обеспечивает повышенные жаропрочные характеристики, но имеет низкую пластичность за счет возникновения остаточных напряжений. Для повышения пластических свойств изделий с такой структурой необходимо проведение стабилизирующей термической обработки в двухфазной ( $\gamma + \alpha_2$ )-области, в процессе которой происходит снятие термических напряжений и стабилизация фаз, что в результате приводит к повышению пластичности.

Для оценки влияния ГИП на структуру материала проведен рентгенографический контроль

отливок рабочих лопаток после ГИП, полученных при оптимальной температуре нагрева форм. Анализ показал, что применение ГИП привело к снижению объемной доли пор более чем в два раза в замковой части и более чем в пять раз в области пера лопатки. Максимальный размер пор уменьшился в четыре раза.

Анализ микроструктуры рабочих лопаток после ГИП-обработки показал, что пластинчатый тип морфологии микроструктуры в образцах-микрошлифах из литых лопаток не изменился: чередующиеся пластины  $\gamma$ - и  $\alpha_2$ -фаз собраны в колонии, расположенные в пределах бывших  $\beta(\alpha)$ -зерен, по границам которых имеется небольшое количество  $\beta$ -фазы (внутри каждой колонии пластины имеют одинаковую геометрическую ориентировку). Поперечные размеры пластинчатых колоний в области пера и в области замка лопатки практически не различаются и составляют в среднем от 100 до 250 мкм. Дефекты в виде микропористости и структурной неоднородности отсутствуют (рис. 7).

Механические свойства при комнатной температуре и рабочей температуре нового сплава были определены как на образцах, вырезанных из отливок, так и на образцах из технологических проб. Результаты испытаний приведены в таблице.

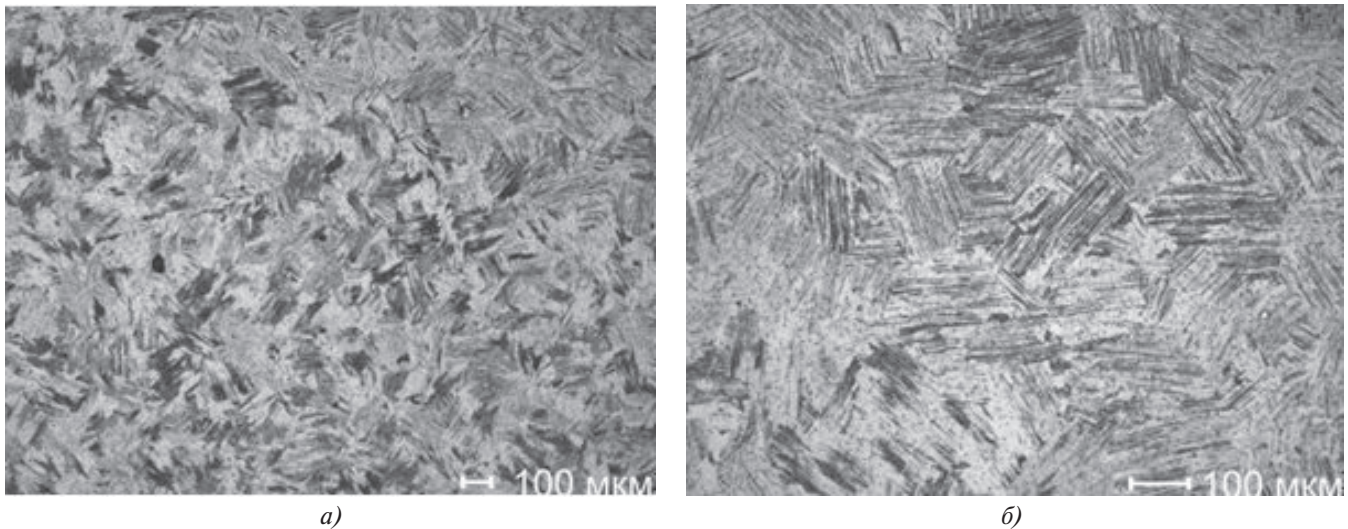


Рис. 7. Микроструктура отливок рабочих лопаток из интерметаллидного титанового гамма-сплава после горячего изостатического прессования: *a* — область пера; *b* — замковая часть

#### Механические свойства отливок из интерметаллидного титанового гамма-сплава

Режим обработки	Температура испытаний	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$E$ , ГПа
Термическая обработка, совмещенная с ГИП	20°C	530	1,1	180
	800°C	515	2,5	—

**Выводы**

1. Исследовано влияние температурно-временных параметров центробежного литья в двухкамерной индукционной печи с холодным тиглем ALD Leicomelt 5 на структуру фасонных отливок из нового интерметаллидного жаропрочного сплава на основе гамма-алюминидов титана TiAl.

2. Разработаны технологии литья и термической обработки, совмещенной с ГИП, позволяющие получать бездефектные фасонные отливки лопаток для турбин низкого давления авиационных газотурбинных двигателей.

3. Определены механические характеристики образцов из литых лопаток, полученных по разработанным технологиям литья и термической обработки.

В целом проведенные исследования показали, что к настоящему времени сформировались вполне четкие перспективы научного поиска в области алюминидов титана и практического применения жаропрочных сплавов на их основе. В этой связи целесообразно продолжать научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по разработке, усовершенствованию и апробации отечественных гамма-сплавов, что становится возможным только в условиях тесной кооперации между научно-исследовательскими, конструкторскими и производственными предприятиями авиационной отрасли Российской Федерации.

**Библиографический список**

1. *Dimiduk D.M.* Gamma titanium aluminide alloys — an assessment within the competition of aerospace structural materials // *Materials Science and Engineering: A*. 1999. Vol. 263. No. 2, pp. 281-288. DOI: 10.1016/S0921-5093(98)01158-7
2. *Каблов Е.Н.* Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7-17.
3. *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
4. *Каблов Е.Н.* Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сборник научно-информационных материалов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: ВИАМ, 2015. — 720 с.
5. *Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С., Боков К.А.* Современные жаропрочные сплавы на основе гамма-алюминидов титана: перспективы разработки и применения // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2014. № 7(709). С. 23-27.
6. *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 Российского фонда фундаментальных исследований*. 2015. № 1(85). С. 18-26.
7. *Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В.* Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля: Монография. — М.: ВИАМ, 2018. — 308 с.
8. *Умарова О.З., Пожого В.А., Бурашина Р.Р.* Формирование структуры и механические свойства жаропрочного сплава на основе алюминидов титана при термической обработке // *Вестник Московского авиационного института*. 2017. Т. 24. № 1. С. 160-169.
9. *Kim Y.-W., Kim S.-L.* Advances in gammalloy materials-processes-application technology: successes, dilemmas, and future // *Journal of Metals*. 2018. Vol. 70. No. 4, pp. 553-560. DOI: 10.1007/s11837-018-2747-x
10. *Appel F., Paul J.D.H., Oehring M.* Gamma titanium aluminide alloys: science and technology. — Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2011. — 745 p.
11. *Kothari K., Radhakrishnan R., Wereley N.M.* Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques // *Progress in Aerospace Sciences*. 2012. Vol. 55, pp. 1-16. DOI: 10.1016/j.paerosci.2012.04.001
12. *Harding R.A., Wickins M., Wang H., Djambazov G., Pericleous K.A.* Development of a turbulence-free casting technique for titanium aluminides // *Intermetallics*. 2011. Vol. 19. No. 6, pp. 805-813. DOI: 10.1016/j.intermet.2010.11.022
13. *Imayev R.M., Imayev V.M., Oehring M., Appel F.* Alloy design concepts for refined gamma titanium aluminide based alloys // *Intermetallics*. 2007. Vol. 15. No. 4, pp. 451-460. DOI: 10.1016/j.intermet.2006.05.003
14. *Wu X.* Review of alloy and process development of TiAl alloys // *Intermetallics*. 2006. Vol. 14. No. 10-11, pp. 1114-1122. DOI: 10.1016/j.intermet.2005.10.019
15. *Wu X., Hu D., Loretto M.H.* Alloy and process development of TiAl // *Journal of Materials Science*. 2004. Vol. 39. No. 12, pp. 3935-3940. DOI: 10.1023/B:JMSC.0000031474.29156.17
16. *Белов В.Д., Петровский П.В., Фадеев А.В., Павлович С.П., Аликин П.В.* Некоторые особенности литья лопаток ТНД газотурбинного двигателя из интерметаллида титана // *Литейщик России*. 2014. № 1. С. 10-12.
17. *Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С.* Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. — М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. — 520 с.
18. *Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В.* Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД // *Труды ВИАМ*. 2013. № 3. URL: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/20.pdf>

19. Белов Н.А., Самошина М.Е. Влияние температуры термообработки на микроструктуру и фазовый состав отливок  $\beta$ -затвердевающего сплава типа TiAl на основе системы Ti-Al-Nb-Mo // Известия вузов. Цветная металлургия. 2013. № 6. С. 27-35. DOI: 10.17073/0021-3438-2013-6-27-35
20. Белов В.Д., Павлинич С.П., Фадеев А.В. Интерметаллид Ti-Al — материал завтрашнего дня для российского двигателестроения // Литейщик России. 2013. № 11. С. 12-14.
21. Имаев В.М., Имаев Р.М., Оленева Т.И. Современное состояние исследований и перспективы развития технологий интерметаллидных  $\gamma$ -TiAl сплавов // Письма о материалах. 2011. Т. 1. №1. С. 25-31.
22. Окунев Ю.К., Рыбин В.В., Слепнев В.Н. Перспективы развития производства литых заготовок из сплавов титана и его интерметаллидов // Вопросы материаловедения. 2005. №4(44). С. 22-36.
23. Иванов В.И., Ясинский К.К. Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti<sub>3</sub>Al и TiAl для работы при температурах 600-800°C в авиакосмической технике // Технология легких сплавов. 1996. № 3. С. 7-12.
24. Солдатенко И.В. К вопросу о контроле качества полуфабрикатов из титановых сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 189-194.
25. Каблов Е.Н., Ночовная Н.А., Каблов Д.Е., Антипов В.В., Панин П.В., Кочетков А.С. Сплав на основе интерметаллида титана и изделие, выполненное из него. Патент № RU 2606368 С1. Бюлл. №1, 10.01.2017.
26. Каблов Е.Н., Ночовная Н.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Сплав на основе гамма-алюминидов титана. Патент № RU 2614354 С1. Бюлл. №9, 24.03.2017.
27. Белов В.Д., Петровский П.В., Павлинич С.П., Аликин П.В., Деменок А.О. Сплав на основе гамма-алюминидов титана. Патент № RU 2520250 С1. Бюлл. №17, 20.06.2014.
28. Каблов Е.Н., Ясинский К.К., Иванов В.И., Анташев В.Г., Тарасенко Е.Н. Сплав на основе титана и изделие, выполненное из него. Патент № РФ 2191841. Бюлл. №30, 27.10.2002.
29. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы — материалы современных и будущих высоких технологий // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 3-10.
30. 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
31. Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С. Проблемы получения химически и структурно однородных слитков из жаропрочных сплавов на основе гамма-алюминидов титана // Проблемы производства слитков и полуфабрикатов из сложнелегированных и интерметаллидных титановых сплавов: Сборник докладов научной конференции. — М.: ВИАМ, 2015. Ст. 03.

## EFFECT OF CASTING PARAMETERS ON SHAPED CASTINGS QUALITY OF A NEW HIGH-TEMPERATURE TiAl BASED ALLOY

**Antipov V.V., Nochovnaya N.A., Kochetkov A.S., Panin P.V.\* , Dzunovich D.A.**

*All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials,  
State Research Center of the Russian Federation,  
VIAM, 17, Radio str., Moscow, 105005, Russia  
\* e-mail: PaninPaV@yandex.ru*

### Abstract

The results of original research on cast structure and properties of a new high-temperature intermetallic gamma alloy Ti-45.5Al-2V-1Nb-1.5Zr(Cr)-Gd-B developed in VIAM [patent RU 2606368] have been discussed. A solidification temperature interval has been determined for the new alloy: solidus temperature 1471°C, liquidus temperature of 1528°C. The pouring gate system has been designed with the help of ProCast software taking into account centrifugal casting technique which provides both full mould filling with molten metal and absence of metallurgical defects in low pressure turbine blade castings. The research was focused

on the effect of temperature and duration parameters of centrifugal casting on macro- and microstructures of shaped castings obtained in induction skull ALD Leicomelt 5 furnace. The X-ray spectral microanalysis has revealed that the samples matrix consists of alternating  $\gamma$ -TiAl and  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al lamellae; there are areas with lower aluminum content and higher content of vanadium and zirconium/chromium; also excess phases enriched with gadolinium and oxygen have been found (complex gadolinium oxides). Microstructure analysis after hot isostatic pressing has shown that plate-like morphology of structure doesn't change: alternating



lamellae of  $\gamma$  and  $\alpha_2$  phases are gathered into colonies within prior  $\beta(\alpha)$  grains with small amounts of  $\beta$  phase along grain boundaries (the plates possess similar geometrical orientation within each lamellae colony). It has been shown that structure homogeneity of castings strongly depends on pre-heating temperature of casting moulds. As the experiment has revealed the optimal pre-heating temperature of casting moulds for the new alloy falls in the interval 750–850°C. The research results have given the opportunity to develop casting and heat treatment processes which allowed to obtain defect-free shaped castings of turbine blades for aviation jet engines.

**Keywords:** intermetallic compounds, titanium aluminide TiAl, gamma alloy, centrifugal casting, shaped castings, castings microstructure, turbine blades.

## References

1. Dimiduk D.M. Gamma titanium aluminide alloys – an assessment within the competition of aerospace structural materials. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, vol. 263, no. 2, pp. 281–288. DOI: 10.1016/S0921-5093(98)01158-7
2. Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 7–17.
3. Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1(34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
4. Kablov E.N. *Tendentsii i orientiry innovatsionnogo razvitiya Rossii. Sbornik nauchno-informatsionnykh materialov* (Tendencies and Reference Points of Russia Innovative Development. Scientific Data Collection), Moscow, VIAM, 2015, 720 p.
5. Nochovnaya N.A., Panin P.V., Kochetkov A.S., Bokov K.A. *Metалловедение i termicheskaya obrabotka metallov*, 2014, no. 7(709), pp. 23–27.
6. Nochovnaya N.A., Panin P.V., Alekseev E.B., Novak A.V. *Vestnik Rossiiskogo fonda fundamental'nykh issledovaniy*, 2015, no. 1(85), pp. 18–26.
7. Nochovnaya N.A., Bazyleva O.A., Kablov D.E., Panin P.V. *Intermetallidnye splavy na osnove titana i nikelya* (Intermetallic alloys based on Titanium and Nickel), Moscow, VIAM, 2018, 308 p.
8. Umarova O.Z., Pozhoga V.A., Buranshina R.R. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 160–169.
9. Kim Y.-W., Kim S.-L. Advances in gammalloy materials—processes—application technology: successes, dilemmas, and future. *Journal of Metals*, 2018, vol. 70, no. 4, pp. 553–560. DOI: 10.1007/s11837-018-2747-x
10. Appel F., Paul J.D.H., Oehring M. *Gamma titanium aluminide alloys: science and technology*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2011, 745 p.
11. Kothari K., Radhakrishnan R., Wereley N.M. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques. *Progress in Aerospace Sciences*, 2012, vol. 55, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.paerosci.2012.04.001
12. Harding R.A., Wickins M., Wang H., Djambazov G., Pericleous K.A. Development of a turbulence-free casting technique for titanium aluminides. *Intermetallics*, 2011, vol. 19, no. 6, pp. 805–813. DOI: 10.1016/j.intermet.2010.11.022
13. Imayev R.M., Imayev V.M., Oehring M., Appel F. Alloy design concepts for refined gamma titanium aluminide based alloys. *Intermetallics*, 2007, vol. 15, no. 4, pp. 451–460. DOI: 10.1016/j.intermet.2006.05.003
14. Wu X. Review of alloy and process development of TiAl alloys. *Intermetallics*, 2006, vol. 14, no. 10–11, pp. 1114–1122. DOI: 10.1016/j.intermet.2005.10.019
15. Wu X., Hu D., Loretto M.H. Alloy and process development of TiAl. *Journal of Materials Science*, 2004, vol. 39, no. 12, pp. 3935–3940. DOI: 10.1023/B:JMSC.0000031474.29156.17
16. Belov V.D., Petrovskii P.V., Fadeev A.V., Pavlinich S.P., Alikin P.V. *Liteishchik Rossii*, 2014, no. 1, pp. 10–12.
17. Il'in A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva* (Titanium Alloys. Composition, Structure, Properties. Reference book). Moscow, VILS–MATI, 2009, 520 p.
18. Kashapov O.S., Novak A.V., Nochovnaya N.A., Pavlova T.V. *Trudy VIAM*, 2013, no. 3, available at: <http://www.viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/20.pdf>
19. Belov N.A., Samoshina M.E. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2013, no. 6, pp. 27–35. DOI: 10.17073/0021-3438-2013-6-27-35
20. Belov V.D., Pavlinich S.P., Fadeev A.V. *Liteishchik Rossii*, 2013, no. 11, pp. 12–14.
21. Imaev V.M., Imaev R.M., Oleneva T.I. *Pis'ma o materialakh*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 25–31.
22. Okunev Yu.K., Rybin V.V., Slepnev V.N. *Voprosy materialovedeniya*, 2005, no. 4(44), pp. 22–36.
23. Ivanov V.I., Yasinskii K.K. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 1996, no. 3, pp. 7–12.
24. Soldatenko I.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 189–194.
25. Kablov E.N., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Antipov V.V., Panin P.V., Kochetkov A.S. *Patent RU 2606368 C1*, 10.01.2017.
26. Kablov E.N., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Panin P.V. *Patent RU 2614354 C1*, 24.03.2017.
27. Belov V.D., Petrovskii P.V., Pavlinich S.P., Alikin P.V., Demenok A.O. *Patent RU 2520250 C1*, 20.06.2014.
28. Kablov E.N., Yasinskii K.K., Ivanov V.I., Antashev V.G., Tarasenko E.N. *Patent RF 2191841*, 27.10.2002.
29. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2013, no. S2, pp. 3–10.
30. Kablov D.E., Panin P.V., Shiryaev A.A., Nochovnaya N.A. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2014, no. 2(31), pp. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33
31. Nochovnaya N.A., Panin P.V., Kochetkov A.S. *Problemy proizvodstva slitkov i polufabrikatov iz slozhnolegirovannykh i intermetallidnykh titanovykh splavov. Sbornik dokladov nauchnoi konferentsii*. Moscow, VIAM, 2015, article 03.