

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОТЛИВОК ИЗ СПЛАВА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© 2017 г. **Р.К. Мысик, С.П. Павлинич, Б.А. Кулаков, С.В. Бакерин,  
С.В. Брусницын, А.В. Сулицин**

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург  
Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ)

Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ)  
(национальный исследовательский университет), г. Челябинск

*Статья поступила в редакцию 26.06.16 г., доработана и подписана в печать 08.08.16 г.*

В ходе работы проведены опытные плавки интерметаллидного титанового сплава в вакуумной индукционной плавильной установке с «холодным тиглем» и изготовлены лопатки газотурбинного двигателя методом литья по выплавляемым моделям в центробежном поле. Изучена структура исходной шихтовой заготовки для выплавки интерметаллидного титанового сплава. Проанализирован ее химический состав. Представлены технологические параметры литья и результаты металлографического анализа полученных лопаток. Установлено, что структура литой лопатки имеет пластинчатое строение и состоит из фаз  $\gamma$  и  $\alpha_2$ . Приведены результаты испытания механических свойств. Установлено, что предел прочности при растяжении  $\sigma_b = 765$  МПа, предел текучести  $\sigma_T = 726,5$  МПа, относительное удлинение  $\delta = 1,6$  %. Исследовано распределение напряжений на пере лопатки и построены эпюры их распределения. Проведены испытания образцов лопаток на длительную прочность ( $t = 650$  °С,  $\tau = 500$  ч), усталостную прочность и ударную вязкость.

**Ключевые слова:** интерметаллидный титановый сплав, центробежное литье, турбинная лопатка, структура, усталостная прочность, длительная прочность, ударная вязкость.

**Мысик Р.К.** – докт. техн. наук, профессор кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: kafedralp@mail.ru.

**Брусницын С.В.** – докт. техн. наук, профессор той же кафедры УрФУ.

**Сулицин А.В.** – канд. техн. наук, доцент той же кафедры УрФУ.

**Павлинич С.П.** – докт. техн. наук, зав. кафедрой «Машины и технологии литейного производства» УГАТУ (450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12). E-mail: kmitlp@mail.ru.

**Бакерин С.В.** – канд. техн. наук, доцент той же кафедры УГАТУ. E-mail: bakerin@mail.ru.

**Кулаков Б.А.** – докт. техн. наук, зав. кафедрой «Металлургия и литейное производство» ЮУрГУ (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76). E-mail: kul@lit.susu.ac.ru.

**Для цитирования:** Мысик Р.К., Павлинич С.П., Кулаков Б.А., Бакерин С.В., Брусницын С.В., Сулицин А.В. Исследование эксплуатационных свойств отливок из сплава специального назначения // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 2. С. 51–58. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-2-51-58.

*Mysik R.K., Pavlinich S.P., Kulakov B.A., Bakerin S.V., Brusnitsyn S.V., Sulitsin A.V.*

### Investigation of operational characteristics of special-purpose alloy castings

The article reviews the experimental melting of an intermetallic titanium alloy in a vacuum induction melting unit equipped with a «cold crucible» and manufacturing of gas turbine engine blades by investment casting in a centrifugal field. It studies the structure of the initial charge blank intended for melting the intermetallic titanium alloy, and analyzes its chemical composition. The article presents the casting process parameters and results of the metallographic analysis of manufactured blades. It was found that the structure of the cast blade is lamellar and consists of phases  $\gamma$  and  $\alpha_2$ . The article provides the mechanical test results. It was found that the ultimate tensile strength was  $\sigma_b = 765$  МПа, the yield point was  $\sigma_T = 726,5$  МПа, the relative elongation was  $\delta = 1,6$  %. The article studies the stress distribution along the blade feather and constructs distribution diagrams. Blade samples were tested for long-term strength ( $t = 650$  °С,  $\tau = 500$  h), fatigue strength, and impact strength.

**Keywords:** intermetallic titanium alloy, centrifugal casting, turbine blade, structure, fatigue strength, long-term strength, impact strength.

**Mysik R.K.** – Dr. Sci. (Tech.), Professor of Department «Foundry engineering and strengthening technology», Urals Federal University (UrFU) (620002, Russia, Ekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: kafedralp@mail.ru.

**Brusnitsyn S.V.** – Dr. Sci. (Tech.), Professor of the same Department, UrFU.

**Sulitsin A.V.** – Cand. Sci. (Tech.), Associate professor of the same Department, UrFU.

**Pavlinich S.P.** – Dr. Sci. (Tech.), Head of Department «Machines and technologies of foundry production», Ufa State Aviation Technical University (USATU) (450000, Bashkortostan, Ufa, K. Marksa str., 12). E-mail: kmitlp@mail.ru.

**Bakerin S.V.** – Cand. Sci. (Tech.), Associate professor of the same Department, USATU. E-mail: bakerin@mail.ru.

**Kulakov B.A.** – Dr. Sci. (Tech.), Head of Department «Metallurgy and foundry engineering» of South Ural State University (National Research University) (454080, Chelyabinsk, Lenina str., 76). E-mail: kul@lit.susu.ac.ru.

**Citation:** Mysik R.K., Pavlinich S.P., Kulakov B.A., Bakerin S.V., Brusnitsyn S.V., Sulitsin A.V. Issledovanie ekspluatatsionnykh svoystv otlivok iz splava spetsial'nogo naznacheniya. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 2. P. 51–58.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-2-51-58.

## Введение

Постоянно растущий интерес к интерметаллидным сплавам обусловлен рядом причин. Прежде всего, это высокая прочность, которая не деградирует с возрастанием температуры, низкая плотность интерметаллидов на основе Al и Ti, которая приводит к высокому отношению прочность/плотность, а также высокая стойкость к окислению и низкая степень крипа (ползучести), рекристаллизации и коррозии [1–6].

Краткий обзор исследований интерметаллидов, являющихся основой высокотемпературных конструкционных материалов, проведен авторами [7]. Широкое применение этих сплавов сдерживают недостаточные значения пластичности и вязкости. Кроме того, в работах [8–10] указывается, что свойства интерметаллидов действительно уникальные, и их нельзя предсказать исходя из свойств и параметров исходных материалов. И наконец, успешное применение интерметаллидов в качестве жаропрочных материалов в значительной степени зависит от способа получения изделий из них.

В последние годы основные усилия исследователей в области интерметаллидных сплавов на основе TiAl были направлены на повышение пластичности, сопротивления ползучести за счет легирования, а также на создание и выбор наиболее рациональной технологии производства. Учитывая низкую пластичность  $\gamma$ -сплавов при комнатной температуре и сложность их механической обработки для получения деталей сложной формы, внимание ученых было обращено на сравнение двух технологий изготовления деталей: деформацию и фасонное литье [11]. Известно, что пластинчатые структуры в интерметаллидных титановых сплавах формируются при фасонном литье, обработке давлением или термической обработке в  $\beta$ -области.

Результаты сравнения двух схем производства деталей свидетельствуют, что предпочтение сле-

дует отдать второму варианту (фасонному литью) благодаря значительным преимуществам по вязкости разрушения (трещиностойчивости) и сопротивлению ползучести. По своим характеристикам  $\gamma$ -сплавы позволяют применять их при высоких температурах ( $\sim 750\div 900$  °C) при производстве литых деталей газотурбинных двигателей (ГТД) из сплавов с пластичностью 0,8–1,5 % при комнатной температуре. Следует отметить и о снижении стоимости деталей, например тонкостенных колес турбонагнетателя и лопаток турбины, так как исключается сложная механическая обработка.

Перспективной технологией изготовления деталей из интерметаллидных титановых сплавов является центробежное литье в керамическую форму в среде высокочистого инертного газа или вакуума. Совокупность новых технологических решений в области плавки и литья этих материалов создает принципиально новые возможности перехода на производство точных фасонных отливок для изготовления высоконагруженных деталей и узлов авиакосмической техники.

Целью настоящей работы являлось изучение эксплуатационных свойств лопаток компрессора высокого давления газотурбинного двигателя из интерметаллидного титанового сплава, изготовленных литьем по выплавляемым моделям в центробежном поле.

## Материалы и методика эксперимента

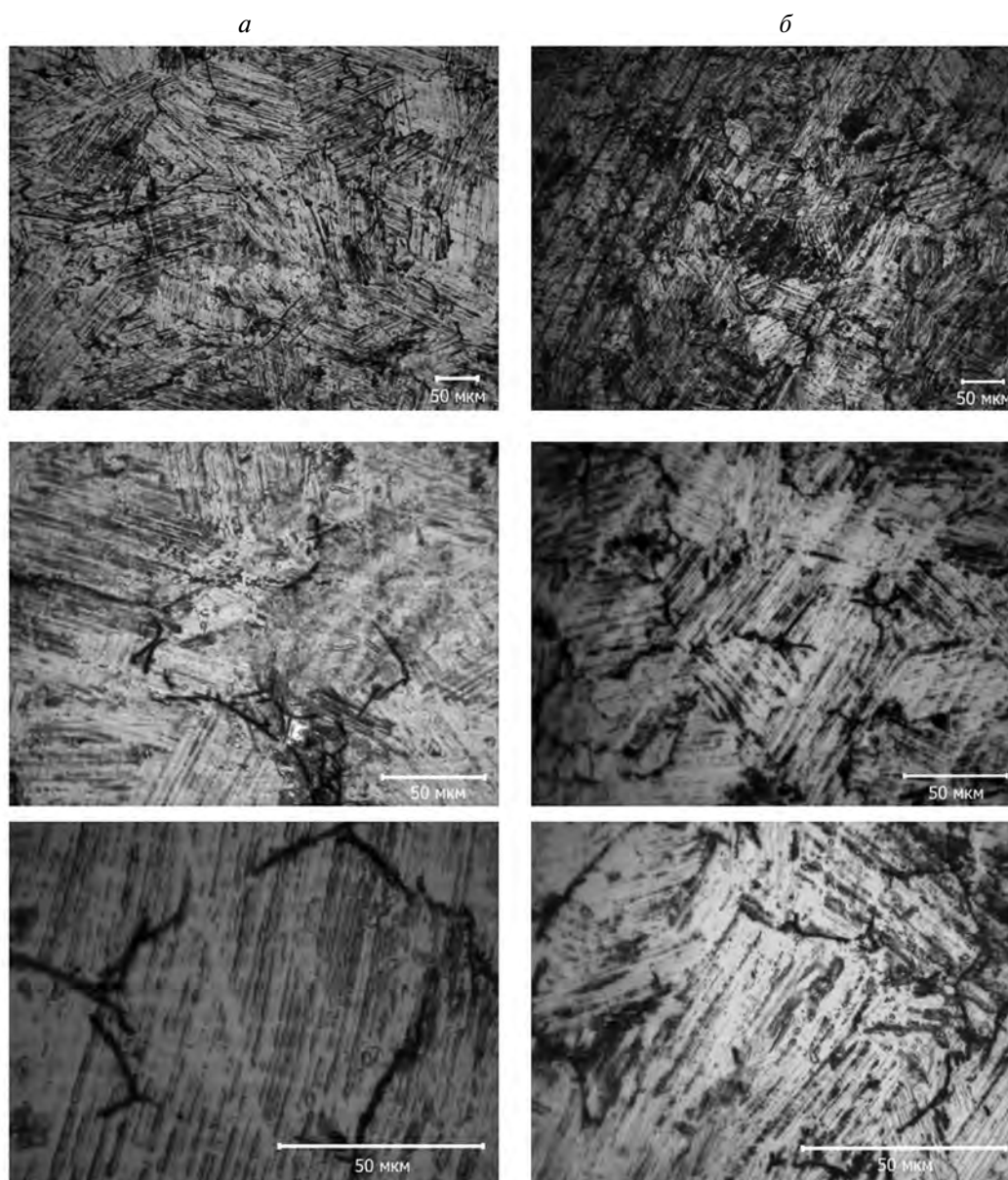
В литейном цехе ПАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение» на установке Consarc были проведены опытные плавки интерметаллидного титанового сплава и залиты формы, изготовленные на низкокремнеземистом гидролизованном этилсиликатном связующем (12 % SiO<sub>2</sub>) с нитратом алюминия на электрокорундовом наполнителе с добавками алюминиево-

го порошка АСД-4 [12–14]. В качестве шихтового материала для плавки указанного материала и изготовления из него лопаток компрессора высокого давления (КВД) использовались заготовки круглого сечения диаметром 55–60 мм и высотой 190–300 мм из сплава марки ТМ-В1. Химический состав заготовок (табл. 1) определялся при помощи спектрального прибора Spectrolab S.

Металлографический анализ шихтовой заготовки показал, что она имеет lamellarную структуру со средним линейным размером пластин на глубине 140–160 мкм, в поверхностной зоне — 60–80 мкм (рис. 1) [15].

Температура расплава в тигле определялась с помощью ИК-спектрометра и составляла 1680 °С, температура нагрева формы — 700 °С, частота вращения формы — 400 об/мин, вакуум — 55 мбар, натекание — 0,03 мбар, давление аргона — 2,0 мбар, время заливки — 2,5 с. Подача аргона при плавке происходила при достижении температуры шихты в тигле 700–800 °С и его давлении 1–2 мм рт. ст. В результате была получена литая лопатка КВД, представленная на рис. 2.

Отлитые лопатки подвергались высокотемпературной газостатической обработке при  $t = 1250$  °С и  $P = 170$  МПа, время выдержки  $\tau = 4$  ч. Далее они



**Рис. 1.** Микроструктура шихтовой заготовки интерметаллидного титанового сплава  
*а* — центр заготовки; *б* — поверхностная зона

Таблица 1  
Химический состав\*  
интерметаллидного титанового сплава TNM-B1

Номер пробы	Ti	Al	Nb	Mo	V
1	60,07	28,6	9,0	2,3	0,03
	51,46	43,48	3,97	0,98	0,11
2	59,676	28,6	9,3	2,4	0,024
	51,209	43,56	4,11	1,03	0,091
3	59,775	28,5	9,3	2,4	0,025
	51,325	43,43	4,12	1,03	0,095

\* В числителе приведены данные в мас. %, в знаменателе – в ат. %.



Рис. 2. Литая лопатка компрессора высокого давления

охлаждались в газостате и подвергались старению при температуре 870 °С в течение 10 ч.

## Полученные результаты и их обсуждение

При металлографическом исследовании травленных шлифов установлено, что структура сплава неоднородна в перо и замке лопатки. В перо наблюдается значительная степень разориентировки пластин  $\gamma$ -фазы, обусловленная более высокой скоростью кристаллизации, чем в замке. Средний размер колоний пластин равен 20–70 мкм. В струк-

Таблица 2  
Условия испытаний лопатки КВД  
на усталостную прочность

№ обр. лопатки	Напряжение $\sigma$ , МПа	Частота $f$ , Гц		Число наработанных циклов $N \cdot 10^{-7}$
		Начало	Конец	
1	310	841	841	2
2	310	839	839	2
3	350	849	849	2
4	350	821	821	2

туре имеется группа «островков» неправильной формы с размерами, значительно превышающими междендритные прослойки. При большом увеличении хорошо видно пластинчатое строение такого «островка» (рис. 3). Наблюдается неравновесная гетерофазная структура, состоящая из отдельных областей  $\gamma$ - и  $\alpha_2$ -фаз. Высокая скорость кристаллизации не позволяет получить полное упорядочение и достичь той морфологии гетерофазной структуры, которая формируется в случае равновесной фазовой диаграммы системы Ti–Al.

Результаты рентгеноструктурного фазового анализа свидетельствуют о том, что в сплаве присутствуют  $\gamma$ - и  $\alpha_2$ -фазы, а также большое число интерференционных линий упорядоченной  $\beta$ -фазы с ОЦК-решеткой. Кроме того, был проведен анализ тонкой структуры сплава в литом состоянии с использованием растрового электронного микроскопа. Микроструктура образца лопатки в обратнорассеянных электронах приведена на рис. 4.

На следующем этапе был выполнен комплекс исследований механических свойств лопатки КВД. Результаты испытаний на усталостную прочность образцов показали (табл. 2), что ни один из них не разрушился.

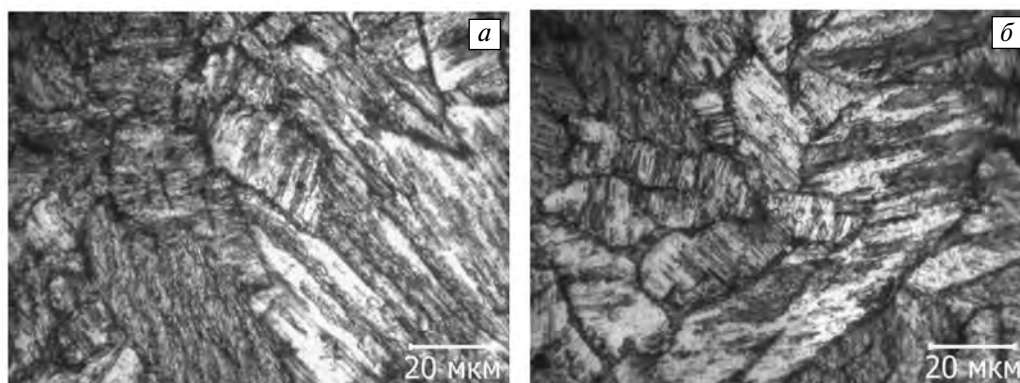


Рис. 3. Микроструктура интерметаллидного титанового сплава в литом состоянии  
а – замок лопатки; б – перо лопатки

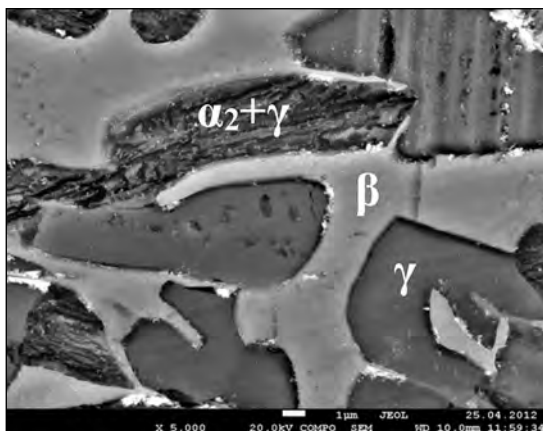


Рис. 4. Микроструктура лопатки из сплава марки TNM-V1 в обратнорассеянных электронах

Известно, что в исследовательской практике при работе с жаропрочными сплавами для производства лопаток ГТД чаще всего изучают предел выносливости на базе  $N = 2 \cdot 10^7$  циклов [16, 17]. За критерий разрушения лопатки принимается изменение частоты колебаний ( $f$ ) на 1–10 % в зависимости от условий эксперимента, которое не должно превышать принятую допустимую величину. Результаты испытания на усталостную прочность показали, что лопатки из интерметаллидного титанового сплава их выдержали. Далее эксперименты были продолжены со ступенчато возрастающей нагрузкой с шагом 40 МПа с целью доведения трех исследуемых образцов лопаток до разрушения (табл. 3).

Установлено, что усталостное разрушение литых лопаток КВД происходит при  $\sigma = 390 \div 430$  МПа и связано, как правило, с влиянием таких статистических факторов, как несовершенство структуры на атомном уровне, а также наличие макро- и микродефектов.

С целью исследования распределения напряжений на пере лопатки и построения соответствующих эпюр проведено препарирование образца лопатки тензодатчиками. Эксперименты осуществляли тензорезисторами с базой не более 5 мм, наклеиваемыми вдоль входной и выходной кромок со стороны корыта и вдоль спинки лопатки в местах наибольших толщин профиля (рис. 5).

По средним значениям относительных напряжений ( $\sigma_{отн} = \sigma_i / \sigma_{max}$ ) по длине лопатки построен график их распределения (рис. 6). Видно, что максимальный уровень напряжений достигается на спинке лопатки в месте наклейки тензорезистора II.

Таблица 3  
Условия и результаты испытания лопаток КВД на усталостную прочность при ступенчато возрастающей нагрузке

№ обр. лопатки	$\sigma$ , МПа	$f$ , Гц		$N \cdot 10^{-6}$	Результаты испытаний
		Начало	Конец		
1	350	841	840	2,0	Не разрушился
	390	838	—	1,5	Разрушился на расстоянии 3–6 мм от полки замка
2	350	849	849	2,0	Не разрушился
	390	849	849	2,0	Не разрушился
	430	849	—	0,76	Разрушился на расстоянии 40–43 мм от полки замка
3	390	821	821	2,0	Не разрушился
	430	821	—	0,34	Разрушился на расстоянии 3–6 мм от полки замка

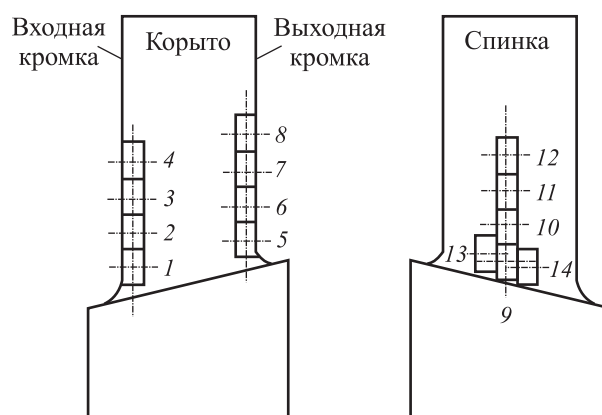
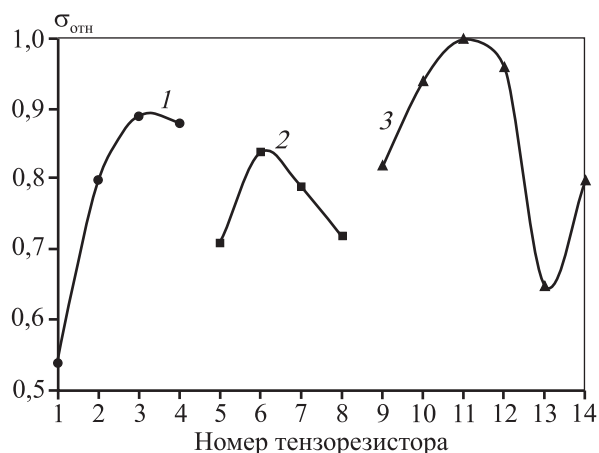


Рис. 5. Схема расположения тензорезисторов 1–14, наклеиваемых вдоль входной и выходной кромок со стороны корыта и вдоль спинки лопатки

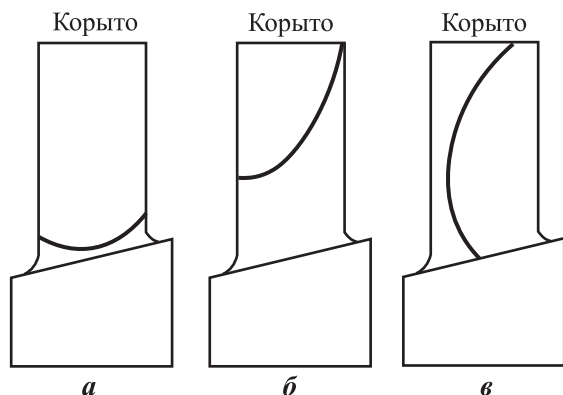
Исследование частот собственных колебаний лопатки методом песочных фигур проводилось на электродинамическом вибростенде при комнатной температуре. Лопатка устанавливалась в универсальном зажиме. Полученные в ходе исследования результаты представлены на рис. 7. Согласно им фигура  $a$  соответствует основной форме колебаний в диапазоне частот 770–782 Гц.

Испытания на длительную прочность проводили по ГОСТ 10145-81 на образцах, вырезанных



**Рис. 6.** Распределение относительных напряжений по длине лопатки

1 – входная кромка, 2 – выходная кромка, 3 – спинка



**Рис. 7.** Результаты исследования частоты собственных колебаний лопатки методом «песочных фигур»

Фигура *а* –  $f = 770$  Гц, *б* –  $1200$  Гц, *в* –  $2380$  Гц

из прилитых к литниково-питающей системе лопаток КВД, прошедших термообработку по режиму ТО 5: высокотемпературная газостатическая обработка при  $t = 1250$  °С;  $P = 170$  МПа;  $\tau = 4$  ч; охлаждение в газостате; старение при  $t = 870$  °С в течение 10 ч.

Литые образцы предварительно подвергались рентгеновскому контролю и были признаны годными. Эксперименты осуществлялись на испытательной машине производства ФГУП «ВИАМ» модели ВП8 по ГОСТ 10145-81 при температуре 650 °С под нагрузкой 230 МПа. В течение 168 ч образец не разорвался. После ступенчатого повышения нагрузки через каждые 24 ч (суммарное время выдержки — 500 ч) до 630 МПа (табл. 4) образец разорвался. При этом относительное удлинение составило 4,0 %, относительное сужение — 5,2 %.

**Таблица 4**  
Условия испытаний на длительную прочность интерметаллидного титанового сплава

$t$ , °С	$\sigma$ , МПа	$\tau$ , ч
650	230	168
650	250	24
650	270	24
650	300	24
650	330	24
650	360	24
650	390	24
650	420	24
650	450	24
650	480	24
650	510	24
650	540	24
650	570	24
650	600	24
650	630	20

Определение ударной вязкости образцов осуществлялось на маятниковом копре мод. 2130 КМ-0,3 по ГОСТ 9454-78. Величина КСУ составила 1–2 Дж/см<sup>2</sup>. Испытания образцов на растяжение проводились по ОСТ 1.90011-70 на испытательной машине Р-5 при комнатной температуре. Получены следующие показатели: предел прочности при растяжении  $\sigma_b = 765$  МПа; предел текучести  $\sigma_r = 726,5$  МПа; относительное удлинение  $\delta = 1,6$  %; относительное сужение  $\psi = 0,5$  %.

Отметим, что все эти данные по механическим свойствам лопаток согласуются с ранее полученными результатами, представленными в работах [18–20].

## Заключение

Перспективной технологией изготовления деталей из интерметаллидного титанового сплава является центробежное литье в керамическую форму в среде инертного газа. Представлены технологические параметры изготовления лопатки КВД, результаты металлографического анализа и испытания механических свойств. Проведены испытания отлитых лопаток на усталостную прочность, которые показали, что они разрушились при  $\sigma = 390\text{--}430$  МПа.

Построение эпюр распределения напряжений выполнено препарированием исследуемых образцов тензорезисторами. Показано, что максимальный уровень напряжений достигается на спинке лопатки. Определены механические свойства образцов:  $\sigma_B = 765$  МПа,  $\sigma_T = 726,5$  МПа,  $\delta = 1,6$  % и  $\psi = 0,5$  %.

Кроме того, проведены испытания образцов на длительную прочность (суммарное время выдержки — 500 ч) и ударную вязкость, значения которой составили  $KCU = 1 \div 2$  Дж/см<sup>2</sup>.

## Литература

1. *Varin R.A., Winnicka M.B.* Plasticity of structural intermetallic compounds // *Mater. Sci. Eng. A.* 1991. Vol. 137. No. C. P. 93—103.
2. *Mazdiyasi S., Miracle D.B., Dimiduk D.M., Mendiratta M.G., Subramanian P.R.* High temperature phase equilibria of the L12 composition in the AlTiNi, AlTiFe, and AlTiCu systems // *Scripta Metall.* 1989. Vol. 23. No. 3. P. 327—331.
3. *Suryanarayana C., Froes F.H.* The current status of titanium rapid solidification // *J. Metals.* 1990. Vol. 42. No. 3. P. 22—25.
4. *Dimiduk D.M.* Gamma titanium aluminide alloys — an assessment within the competition of aerospace structural materials // *Mater. Sci. Eng. A.* 1999. Vol. 263. No. 2. P. 281—288.
5. *Dimiduk D.M., Mendiratta M.G., Subramanian P.R.* Development approaches for advanced intermetallic materials — historical perspective and selected successes // *Proc. 1-st Int. Symp. on Structural Intermetallics.* Champion, PA, USA, 1993. P. 619—630.
6. *Yamaguchi M., Inui H.* TiAl compounds for structural applications // *Proc. 1-st Int. Symp. on Structural Intermetallics.* Champion, PA, USA, 1993. P. 127—142.
7. *Yamaguchi M., Umakoshi Y.* The deformation behavior of intermetallic superlattice compounds // *Progr. Mater. Sci.* 1990. Vol. 34. No. 1. P. 1—148.
8. *Гринберг Б.А., Иванов М.А.* Интерметаллиды Ni<sub>3</sub>Al и TiAl: Микроструктура, деформационное поведение. Екатеринбург: УрО РАН, 2002.
9. *Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшин И.С.* Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. М.: ВИЛС—МАТИ, 2009.
10. *Appel F., Paul J.D.H., Oehring M.* Gamma titanium aluminides alloys. Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2011.
11. *Хаунтман Т., Биллхофер Г.* Титановые сплавы как перспективные материалы для изготовления литых

деталей в авиамоторостроении // *Литейщик России.* 2011. No. 7. С. 5—8.

12. *Дубровин В.К.* Теоретические основы и технологии процессов формообразования на основе кремнеземистых и силикатных систем в точном литье: Дис. ... докт. техн. наук. Челябинск: ЮУрГУ, 2010.
13. *Pavlinich S.P., Bakerin S.V., Zaitsev M.V., Mysik R.K., Sulitsin A.V.* Investigation of thin-walled titanium aluminide lost-wax casting structure and properties // *Advanced Materials and Processing Technology — 2013: Mater. Int. XIV Russian-Chinese Symp. Proc.* Khabarovsk: Pacific National University, 2013. P. 235—238.
14. *Павлинич С.П., Бакерин С.В., Зайцев М.В., Мысик Р.К., Сулицин А.В.* Изготовление тонкостенных отливок из алюминида титана методом литья по выплавляемым моделям // *Тр. XI Съезда литейщиков России.* Нижний Тагил: Изд-во УВЗ, 2013. С. 319—322.
15. *Павлинич С.П., Бакерин С.В., Брусницын С.В., Сулицин А.В., Карпинский А.В.* Исследование структуры и свойств шихтовой заготовки для выплавки интерметаллидного сплава // *Литейщик России.* 2012. No. 2. С. 17—19.
16. *Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов: Спр. пос. / Под ред. А.Т. Туманова.* М.: Машиностроение, 1974.
17. *Каблов Е.Н.* Литые лопатки газотурбинных двигателей. М.: МИСиС, 2001.
18. *Имаев Р.М., Кайбышев О.А., Салищев Г.А.* Механические свойства мелкозернистого интерметаллида TiAl // *Физика металлов и металловедение.* 1991. No. 8. С. 179—197.
19. *Польшин И.С., Гребенюк О.Н., Саленков В.С.* Интерметаллиды на основе титана // *Технол. легких сплавов.* 2010. No. 2. С. 5—15.
20. *Мамонов А.М., Ильин А.А., Носов В.К.* Особенности и перспективы применения водородной технологии сплавов на основе Ti<sub>3</sub>Al // *Авиационная пром-сть.* 2002. No. 2. С. 14—17.

## References

1. *Varin R.A., Winnicka M.B.* Plasticity of structural intermetallic compounds. *Mater. Sci. Eng. A.* 1991. Vol. 137. No. C. P. 93—103.
2. *Mazdiyasi S., Miracle D.B., Dimiduk D.M., Mendiratta M.G., Subramanian P.R.* High temperature phase equilibria of the L12 composition in the AlTiNi, AlTiFe, and AlTiCu systems. *Scripta Metall.* 1989. Vol. 23. No. 3. P. 327—331.
3. *Suryanarayana C., Froes F.H.* The current status of tita-

- nium rapid solidification. *J. Metals*. 1990. Vol. 42. No. 3. P. 22—25.
4. *Dimiduk D.M.* Gamma titanium aluminide alloys — an assessment within the competition of aerospace structural materials. *Mater. Sci. Eng. A*. 1999. Vol. 263. No. 2. P. 281—288.
  5. *Dimiduk D.M., Mendiratta M.G., Subramanian P.R.* Development approaches for advanced intermetallic materials — historical perspective and selected successes. In: *Proc. 1-st Int. Symp. on Structural Intermetallics*. Champion, PA, USA, 1993. P. 619—630.
  6. *Yamaguchi M., Inui H.* TiAl compounds for structural applications. In: *Proc. 1-st Int. Symp. on Structural Intermetallics*. Champion, PA, USA, 1993. P. 127—142.
  7. *Yamaguchi M., Umakoshi Y.* The deformation behavior of intermetallic superlattice compounds. *Progr. Mater. Sci.* 1990. Vol. 34. No. 1. P. 1—148.
  8. *Grinberg B.A., Ivanov M.A.* Intermetallidy Ni<sub>3</sub>Al i TiAl: Mikrostruktura, deformatsionnoe povedenie [Intermetallics Ni<sub>3</sub>Al and TiAl: Microstructure, deformation behaviour]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2002.
  9. *Iliyn A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S.* Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoistva: Spravochnik [Titanium alloys. Composition, structure, properties: Handbook]. Moscow: VILS—MATI, 2009.
  10. *Appel F., Paul J.D.H., Oehring M.* Gamma titanium aluminides alloys. Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2011.
  11. *Hauptman T., Billhofer G.* Titanovye splavy kak perspektivnye materialy dlya izgotovleniya litykh detalei v aviamotorostroenii [Titanium alloys as perspective materials for cast aviation engines parts making]. *Liteishchik Rossii*. 2011. No. 7. P. 5—8.
  12. *Dubrovin V.K.* Teoreticheskie osnovy i tekhnologii protsessov formoobrazovaniya na osnove kremnezemistykh i silikatnykh sistem v tochnom lit'e [Theoretical basics and technologies of forming processes on the basis of silica and silicate systems in precision casting]: Dis. Dr. Sci. (Tech.). Chelyabinsk: SUSU, 2010.
  13. *Pavlinich S.P., Bakerin S.V., Zaitsev M.V., Mysik R.K., Sulitsin A.V.* Investigation of thin-walled titanium aluminide lost-wax casting structure and properties. In: *Advanced Materials and Processing Technology — 2013: Mater. Int. XIV Russian-Chinese Symp. Proc.* Khabarovsk: Pacific National University, 2013. P. 235—238.
  14. *Pavlinich S.P., Bakerin S.V., Zaitsev M.V., Mysik R.K., Sulitsin A.V.* Izgotovlenie tonkostennykh otlivok iz alyumini-da titana metodom lit'ya po vyplavyaemym modelyam [Lost-wax casting of titanium aluminide thin-walled castings]. In: *Proc. XI Russian forum of casters*. Nizhny Tagil: UVZ, 2013. P. 319—322.
  15. *Pavlinich S.P., Bakerin S.V., Brusnitsyn S.V., Sulitsin A.V., Karpinskiy A.V.* Issledovanie struktury i svoistv shikhtovoi zagotovki dlya vyplavki intermetallidnogo splava [Investigation of structure and properties of rod-charge for intermetallic alloy melting]. *Liteishchik Rossii*. 2012. No. 2. P. 17—19.
  16. *Tumanov A.T.* Ed. *Metody ispytaniya, kontrolya i issledovaniya mashinostroitel'nykh materialov: Sprochnoe posobie* [Methods of test, control and investigation of engineering materials: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1974.
  17. *Kablov E.N.* Litye lopatki gazoturbinykh dvigatelei [Cast blades for gas-turbine engines]. Moscow: MISIS, 2001.
  18. *Imaev R.M., Kaibyshev O.A., Salishev G.A.* Mekhanicheskie svoistva melkozernistogo intermetallida TiAl [Mechanical properties of fine-grained intermetallic TiAl]. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1991. No. 8. P. 179—197.
  19. *Polkin I.S., Grebenuk O.N., Salenkov V.S.* Intermetallidy na osnove titana [Titanium based intermetallics]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2010. No. 2. P. 5—15.
  20. *Mamonov A.M., Iliyn A.A., Nosov V.K.* Osobennosti i perspektivy primeneniya vodorodnoi tekhnologii splavov na osnove Ti<sub>3</sub>Al [Features and perspectives of hydrogen technology application for Ti<sub>3</sub>Al-based alloys]. *Aviatsionnaya promyshlennost'*. 2002. No. 2. P. 14—17.