

УДК 669.245

Б.С. Ломберг<sup>1</sup>, С.В. Овсепян<sup>1</sup>, М.М. Бакрадзе<sup>1</sup>, М.Н. Летников<sup>1</sup>, И.С. Мазалов<sup>1</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129

*Представлены результаты работ, направленных на внедрение новых никелевых жаропрочных деформируемых сплавов, созданных во ФГУП «ВИАМ», в производство перспективных российских газотурбинных двигателей. Исследования в области материаловедения и технологий производства обеспечили промышленное изготовление крупногабаритных заготовок деталей из сплава ВЖ175-ИД с повышенными эксплуатационными свойствами. Разработаны технологии, обеспечивающие применение новых конструктивных решений для узлов ротора ГТД — заготовок рабочего колеса турбины, роторов конструкции типа «блиск» из сплава ЭП975-ИД с паяным соединением лопаток. Впервые из никелевого жаропрочного сплава ВЖ172 изготовлены сварные конструкции роторов компрессора высокого давления и турбины. Для жаровой трубы камеры сгорания перспективного вертолетного двигателя опробован сплав ВЖ171, упрочняемый внутренним азотированием.*

**Ключевые слова:** *никелевые жаропрочные деформируемые сплавы, газотурбинный двигатель, диски ротора, сварной ротор, технология производства,  $\gamma'$ -фаза, микроструктура, механические свойства, камера сгорания, жаровая труба, химико-термическая обработка.*

B.S. Lomberg, S.V. Ovsepyan, M.M. Bakradze, M.N. Letnikov, I.S. Mazalov

### The application of new wrought nickel alloys for advanced gas turbine engines

*The article presents the results of work, aimed at introducing new heat-resistant wrought nickel alloys, developed at FSUE «VIAM» into production of advanced gas turbine engines (GTE).*

*Researches in the field of materials science and manufacturing technologies have provided industrial production of large-sized component billets from VZh 175-ID alloy with improved performance properties. Technologies have been developed, ensuring the use of new constructive solutions for rotor units of GTE — billets of turbine disk and «blisk» rotor construction made from EP975-ID with solder joint of turbine blades.*

<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

*For the first time, welded constructions of high pressure compressor rotor and turbine were made from VZh172 nickel superalloy, VZh171 superalloy, strengthened by the internal nitration has been tested for combustion chamber of advanced helicopter engine.*

**Keywords:** wrought heat-resistant nickel alloys, gas turbine engine, rotor disks, welded rotor, manufacturing technologies, gamma-prime phase, microstructure, mechanical properties, combustion chamber, flame tube, thermochemical treatment.

## Введение

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 9.7. «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, карбидами, нитридами и др., истираемые уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1]. Для газотурбинных двигателей (ГТД) поколений 5 и 5+ во ФГУП «ВИАМ» разработаны высокожаропрочные никелевые сплавы, не уступающие зарубежным аналогам по прочностным характеристикам и превосходящие их по длительной прочности [2–12].

Задача внедрения разработанных материалов для новых отечественных ГТД была приоритетной при выполнении исследований и осуществлении разработок, выполненных во ФГУП «ВИАМ» за последние 5 лет.

В работе принимали участие И.В. Кабанов (АО «МЗ «Электросталь»), В.А. Калищев, М.В. Бубнов, Н.Л. Вавилин, М.В. Ахмедзянов, О.И. Распоргуева, Е.Б. Чабина, Е.В. Филонова (ФГУП «ВИАМ»).

## Материалы для дисков турбины и компрессоров высокого давления

В табл. 1 приведены паспортные значения механических и жаропрочных свойств новых деформируемых высокожаропрочных сплавов для дисков ГТД, разработанных во ФГУП «ВИАМ» в последние годы, в сравнении с зарубежными аналогами.

Сплав ЭП975-ИД хотя и разработан ранее, до сих пор не имеет аналогов по уровню длительной прочности как в России, так и за рубежом.

Во ФГУП «ВИАМ» в период 2012–2016 гг. были созданы и освоены в промышленном производстве крупногабаритные штамповки дисков (диаметром 550–600 мм) из сплава ВЖ175-ИД для двигателя ПД-14. Разработку проводили совместно с АО «Металлургический завод «Электросталь» и АО «Ступинская металлургическая компания» Сплав ВЖ175-ИД является сложнолегированным (количество упрочняющей  $\gamma'$ -фазы

составляет 50%), поэтому освоение его металлургического производства, включающее выплавку, деформацию и термообработку, являлось весьма сложной задачей.

Таблица 1

**Сравнительные свойства (средние значения) сплавов для дисков ГТД**

Сплав	$T_{исп},$ °С	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma_{100}$	$\sigma_0$ на базе 10 <sup>4</sup> ци- клов
		МПа				МПа	
<b>Отечественные сплавы</b>							
ВЖ175 (паспорт №1805)	20	1599	1192	14	37	—	1334
	650	1530	1079	12	38	1050	1275
	750	1192	1030	6	35	638	1128
ВЖ177 (паспорт №1915)	20	1555	1005	16	38	—	1300
	750	1145	970	4,1	32	770	930
	800	1030	965	3	31	500	800
ЭП975 (спра- вочник «Авиа- ционные мате- риалы», Т. 3)	20	1380	1010	19	47	—	—
	650	1235	960	19	46	1050	1080
	750	1080	880	23	44	735	980
<b>Зарубежные аналоги</b>							
Rene 88 DT	20	1566	1137	20	—	—	—
	650	1483	1020	18	—	995	—
	750	1166	964	13	—	631	—
Me3 (Rene 104)	20	1650	1150	21	—	—	—
	750	—	—	—	—	690	—

При разработке промышленных технологий применены новые подходы, позволившие обеспечить получение опытной партии штамповок семи наименований для двигателя ПД-14 (поставка по ТУ14-131-1121–2013). По результатам проведенных исследований разработана серийная технология выплавки, деформации и термической обработки крупногабаритных штамповок дисков турбин из сплава ВЖ175-ИД, обеспечившая комплекс механических свойств в соответствии с техническими условиями на штамповки дисков. Внешний вид изготовленных штамповок приведен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид штамповок дисков из сплава ВЖ175-ИД для двигателя ПД-14

Свойства опытной партии изготовленных штамповок приведены в табл. 2, а макроструктура крупногабаритной штамповки диска представлена на рис. 2. По всему сечению штамповки зерно полностью рекристаллизованное, однородное, размером <2 мм.

Таблица 2

**Свойства (средние значения) крупногабаритных штамповок дисков из сплава ВЖ175-ИД**

Полуфабрикат	Кратковременные свойства при 20°C				Жаропрочность при температуре, °C				МЦУ: $\sigma_{\max}$ , МПа, на базе $10^4$ цикл при 650°C для образцов	
	$\sigma_B$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	650		750		гладких	с надрезом
					σ, МПа	τ, ч	σ, МПа	τ, ч		
Штамповки дисков $\varnothing 550-650$ мм, массой 80-180 кг	1568	1110	18	50	1050	≥100	637	≥100	1274	500



Рис. 2. Макроструктура крупногабаритной штамповки диска из сплава ВЖ175-ИД

На основании результатов испытаний опытной партии крупногабаритных штамповок из сплава ВЖ175-ИД (диаметром – до 600 мм, массой – до 180 кг) составлено Дополнение №2 к паспорту №1805.

Проведена оценка структурно-фазового состояния сплава ВЖ175-ИД после стандартной термической обработки (СТО) и длительных выдержек при рабочей температуре. По результатам исследования структуры и свойств показано, что сплав сохраняет высокую структурно-фазовую стабильность и длительную работоспособность.

Микроструктура штамповки диска из сплава ВЖ175-ИД после СТО однородная, мелкозернистая, 8 балла по ГОСТ 5639, типична для сплава ВЖ175-ИД в термообработанном состоянии. Исследования, проведенные методом растровой электронной микроскопии, показали, что после СТО структура сплава ВЖ175-ИД представляет собой зерна  $\gamma'$ -фазы. По границам зерен расположены крупные частицы первичной  $\gamma'$ -фазы. Границы зерен упрочнены частицами зернограничной  $\gamma'$ -фазы, вторичных карбидов и боридов различной дисперсности. В сплаве также содержатся первичные карбиды MeC. Морфология частиц вторичной  $\gamma'$ -фазы близка к кубической, в прослойках  $\gamma$ -твердого раствора и на границах раздела фаз наблюдаются частицы третичной  $\gamma'$ -фазы размером  $<50$  нм.

Изготовлен и аттестован комплект стандартных образцов состава сплава ВЖ175-ИД.

Крупногабаритные штамповки из сплава ВЖ175-ИД рекомендованы для изготовления дисков ГТД и ГТУ, работающих при температурах до  $750^{\circ}\text{C}$  с кратковременными забросами до  $800^{\circ}\text{C}$ .

В настоящее время штамповки дисков из сплава ВЖ175-ИД поставки АО «Металлургический завод «Электросталь» для двигателя ПД-14 приняты АО «Авиадвигатель» в производство и проходят испытания по программе специальной квалификации. Применение нового сплава в перспективных двигателях обеспечит повышение рабочей температуры дисков турбины на  $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$  и ресурса их работы в 1,5–2 раза.

В опытно-промышленном производстве ФГУП «ВИАМ» разработаны технологии изотермической штамповки и термической обработки заготовок дисков из сплава ВЖ175-ИД диаметром до 350 мм с развитой ступичной частью для свободной турбины вертолетного двигателя ВК-2500М разработки АО «Климов» (рис. 3). Штамповки изготовлены из пресс-прутка диаметром 150 мм, впервые полученного в условиях АО «МЗ «Электросталь» (протокол поставки №1064–2013).

Средние значения механических свойств приведены в табл. 3. По специальной программе получены расчетные значения характеристик прочности для малогабаритных штамповок из сплава ВЖ175-ИД.



Рис. 3. Внешний вид малогабаритных штамповок из сплава ВЖ175-ИД

Таблица 3

**Свойства (средние значения) малогабаритных штамповок дисков из сплава ВЖ175-ИД**

Полуфабрикат	Кратковременные свойства при 20°С				Жаропрочность при температуре 650°С	
	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma$ , МПа	$\tau$ , ч
	МПа					
Штамповки дисков диаметром до 350 мм, массой 35 кг	1605	1155	19	39,8	1055	≥100

На машиностроительном предприятии АО «Климов» изготовлен диск турбины вертолетного двигателя и проведены разгонные испытания в составе автономной установки, которые подтвердили возможность исполнения диска данного конструктивного исполнения в составе двигателя. Результаты работы будут использованы при модернизации вертолетного двигателя ВК-2500М, а также при создании перспективного вертолетного двигателя.

Самый жаропрочный серийный деформируемый никелевый сплав ЭП975-ИД в качестве материала дисков турбины длительно работоспособен до температуры 850°С. Этот сплав успешно применяют для роторов турбин вспомогательных силовых установок (ТА-8В, ТА-14 и др.). В этом случае вал, диск и лопатки делают целиком из одной заготовки. Гарантируемые нормы механических свойств сплава по действующим техническим условиям представлены в табл. 4.

Таблица 4

Механические свойства сплава ЭП975-ИД по действующим ТУ

Нормативная документация	Кратковременные свойства при 20°С				КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Жаропрочность, МПа	
	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$		$\sigma_{100}^{850^\circ}$	$\sigma_{40}^{975^\circ}$
	МПа		%				
ТУ 14-131-1124–2013	1230	930	14	16	39	329	176
ТУ 1-595-3-1196–2012	1274	930	14	16,8	39	-	176

Вследствие высокого (до 56%) содержания упрочняющей  $\gamma'$ -фазы с температурой полного растворения до 1205°С, а также повышенного количества вольфрама (до 11%), сплав ЭП975-ИД с технологической точки зрения является сложным труднодеформируемым сплавом.

В связи с этим процессы металлургического передела слитков ВДП (вакуумный дуговой переплав) и последующего изготовления заготовок дисков строго регламентированы и включают операции получения пресс-прутков и последующей штамповки в «горячих» штампах или в изотермических условиях.

С научно-техническим сопровождением ФГУП «ВИАМ» изготовление штамповок роторов сложной формы с длинным валом из сплава ЭП975-ИД освоено в АО «СМК». В последние годы АО «МЗ «Электросталь» также освоило и поставляет несколько наименований таких заготовок – массой ~50 кг по ТУ14-131-1124–2013 «Штамповки из сплава марки ЭП975-ИД» (рис. 4, а, б). В опытно-промышленном производстве ФГУП «ВИАМ» производятся штамповки дисков из сплава ЭП975-ИД для малоразмерных ГТД по ТУ1-595-3-1196–2012 (рис. 4, в).

Производство заготовок деталей из сплава ЭП975-ИД постоянно совершенствуется. Для изготовления роторов более мощных вспомогательный силовых установок требуются заготовки большего размера и массы (ТА18-100, ТА18-200). Для обеспечения заданного уровня свойств и повышения выхода годного проводятся исследования по оптимизации технологии деформации и термической обработки с применением компьютерного моделирования.

Для производства ротора турбины перспективных ГТД, в том числе вертолетного двигателя (ПДВ), проведены исследовательские работы по соединению деформированной заготовки из сплава ЭП975 с литыми

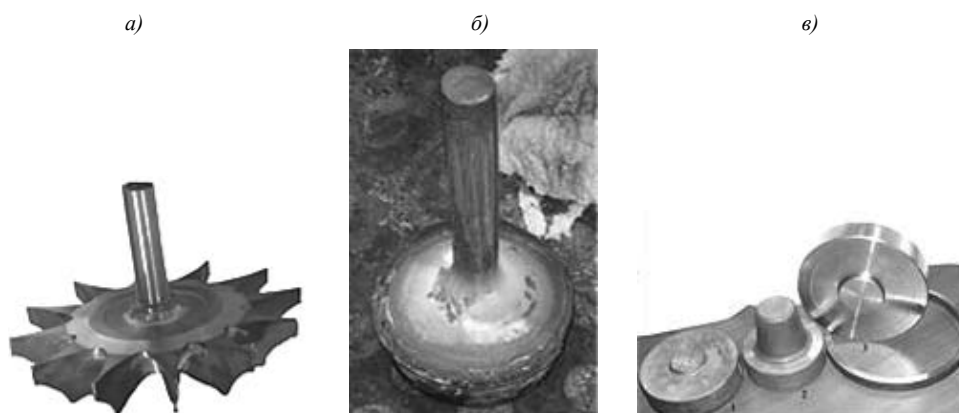


Рис. 4. Изделия и заготовки из сплава ЭП975-ИД:  
а – ротор вспомогательной силовой установки ТА-8;  
б – штамповка ротора; в – штамповки дисков для малоразмерных ГТД  
(производство ФГУП «ВИАМ»)

лопатками из интерметаллидных сплавов на основе  $Ni_3Al$  (типа ВКНА) методами ротационной сварки трением, пайки, а совместно с ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН и ИПСМ РАН – твердофазной сваркой давлением в условиях высокотемпературной сверхпластичности [13, 14].

### **Жаропрочные деформируемые свариваемые сплавы**

Материалы разработки ФГУП «ВИАМ» для деталей ГТД и энергетических установок включают широкий спектр деформируемых свариваемых жаропрочных сплавов на никелевой основе различного назначения. Среди созданных в последнее время – высокопрочный свариваемый сплав ВЖ172; сплав ВЖ176, обладающий сниженным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), а также высокотемпературный жаростойкий, упрочняемый нитридами титана, листовой сплав ВЖ171 с рабочей температурой до  $1250^{\circ}C$ .

Одним из конструктивных решений по снижению массы узлов ротора перспективных ГТД является создание сварной конструкции компрессора высокого давления (КВД) из никелевого сплава, пригодного к сварке плавлением, при этом не уступающего по прочностным характеристикам серийно применяемым несвариваемым дисковым сплавам.

Во ФГУП «ВИАМ» разработана технология изготовления поковок из сплава ВЖ172, ранее паспортизованного как листовой материал, и даны предложения по внедрению полученных результатов работ. Совместно ФГУП «ВИАМ» и АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» проведены



работы по электронно-лучевой сварке (ЭЛС) кольцевых заготовок из сплава ВЖ172 с получением имитатора неразъемного соединения заготовок ротора КВД. Показано, что сварное соединение колец из сплава ВЖ172, полученное ЭЛС, имеет прочность, равную основному материалу [15].

Сочетание механических свойств, приближающихся при температурах 650–750°С к свойствам труднодеформируемых несвариваемых дисковых сплавов (ЭП742, ЭК79, ЭИ698), высокая технологичность и свариваемость сплава ВЖ172 позволили использовать его в качестве материала сварного ротора компрессора КВД для перспективных изделий (табл. 5).

Таблица 5

**Механические свойства (средние значения) сплава ВЖ172 в сравнении с серийными материалами для дисков ГТД**

Сплавы для дисков ГТД (тип)	$\sigma_{\text{в}}^{20^\circ}$	$\sigma_{100}^{600^\circ}$	$\sigma_{100}^{650^\circ}$	$\sigma_{100}^{700^\circ}$	$\sigma_{100}^{750^\circ}$	$\sigma_{0,2/100}^{700^\circ}$	$\sigma_{0,2/100}^{750^\circ}$
	МПа						
ВЖ172 (свариваемый)	1320–1350	960	800	630	460	540	360
Inconel 718 (свариваемый)	1350	870	635	500	345	370	230
ЭИ698 (несвариваемый)	1200	—	700	—	410	—	360
ЭП742 (несвариваемый)	1295	900	810	—	570	—	450

При освоении новых материалов, полуфабрикатов и технологий для модернизации вертолетных двигателей, разработана опытная технология получения конструкции ротора турбины двигателя вертолета из никелевого жаропрочного сплава ВЖ172 с применением неразъемных сварных соединений заготовок [16]. Разработаны технологии изготовления заготовок деталей ротора (дисков) из сплава ВЖ172 и их электронно-лучевой сварки (ЭЛС), обеспечивающей соединение, равнопрочное с основным материалом. Выпущена технологическая документация на производство и поставку заготовок дисков из сплава ВЖ172 производства ФГУП «ВИАМ» и изготовлена опытно-промышленная партия заготовок деталей ротора (дисков) из сплава ВЖ172, определены расчетные значения характеристик прочности в соответствии с РЦ АП 33.15-1 для основных деталей двигателя. На машиностроительном предприятии АО «Климов» осуществлено технологическое опробование и изготовление сварной конструкции диска ротора турбины из сплава ВЖ172 и проведены ее испытания на автономной установке (рис. 5).

Результаты опробования свидетельствуют о возможности использования разработанных технологий с целью создания сварной конструкции ротора турбины из сплава ВЖ172 для вертолетного двигателя ВК-2500М разработки АО «Климов». Применение рабочих колес из сплава ВЖ172 со сварным соединением в конструкции свободной турбины перспективного двигателя вертолета вместо дисков из несвариваемого сплава ЭИ437БУ позволит снизить на 10–15% массу узла за счет отсутствия крепежного соединения.

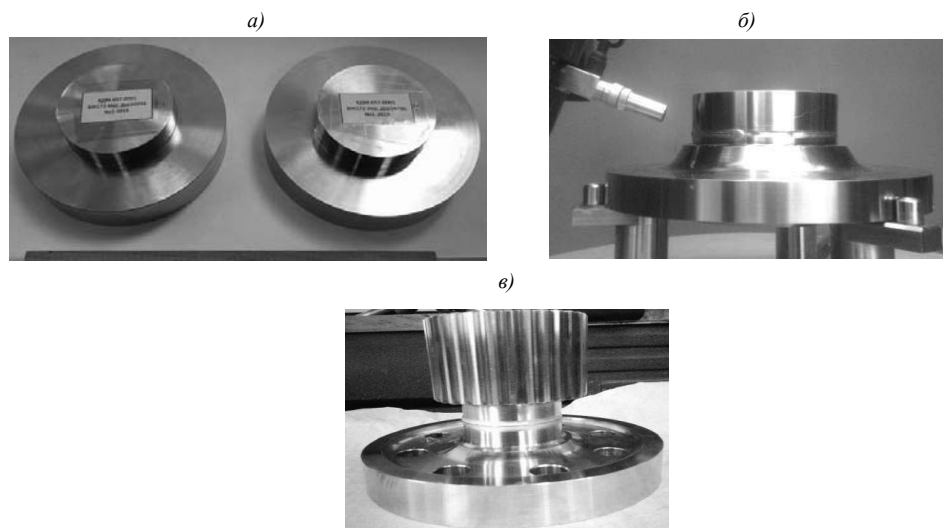


Рис. 5. Заготовки для ротора ГТД из сплава ВЖ172-ИШ:  
*a* – заготовки дисков свободной турбины;  
*б, в* – сварные заготовки деталей ротора

В 2014–2016 гг. в рамках НИР с АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» проведены работы, в результате которых в промышленных условиях АО «МЗ «Электросталь» отработана технология и получены крупногабаритные заготовки дисков диаметром >650 мм и вала длиной 450 мм из высокопрочного никелевого сплава ВЖ172 (рис. 6).

Проведены испытания механических свойств и получены прочностные характеристики заготовок дисков и вала. В условиях АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» осуществлена отработка технологических процессов изготовления дисков и вала КВД из сплава ВЖ172-ИШ, в том числе осуществлен выбор режимов и отработан процесс электронно-лучевой сварки и последующей термической обработки сварного узла ротора КВД. Впервые в практике отечественного машиностроения изготовлена сварная конструкция ротора КВД последних ступеней из жаропрочного никелевого сплава.

Для элементов сопряжения компрессора с рабочей температурой до 600°C разработан высок прочный листовой свариваемый сплав на



Рис. 6. Заготовки дисков (а) и вала (б) для сварного ротора компрессора высокого давления

никель-железо-кобальтовой основе марки ВЖ176 с параметрами  $\sigma_B^{20^\circ} = 1400$  МПа,  $\sigma_{100}^{600^\circ} = 950$  МПа. Оптимизированы технологии его получения, сварки и термической обработки. В интервале температур 20–600°C сплав превосходит серийные сплавы: отечественный ЭП718 и зарубежный Incoloy 907 по прочности – на 10–25%, по жаропрочности – на 15–20%. Сплав ВЖ176 обладает низким ТКЛР ( $\alpha = 11,8 \cdot 10^{-6}$  K<sup>-1</sup> в диапазоне температур 20–600°C) и рекомендован для опробования в качестве материала корпуса КВД для перспективных двигателей.

Сплав ВЖ171 – листовая свариваемый материал, разработанный для тонкостенных деталей ГТД, в том числе жаровых труб камеры сгорания, деталей форсажной камеры, реактивного сопла. В результате химико-термической обработки сплав ВЖ171 упрочняется частицами нитридов титана. Максимальная рабочая температура сплава ВЖ171 составляет 1250°C, а показатели жаропрочности при рабочих температурах в 3–4 раза выше, чем у серийных материалов аналогичного применения (табл. 6).

Таблица 6

**Механические свойства (средние значения) свариваемых жаростойких сплавов**

Сплав	Рабочая температура, °C	$\sigma_B^{20^\circ}$	$\sigma_{100}^{1000^\circ}$	$\sigma_{100}^{1100^\circ}$	$\sigma_{100}^{1200^\circ}$
		МПа			
ВЖ171	1250	870	70	45	23
ЭП648	1000	930	29	—	—
ВЖ98	1000	880	25	—	—
ВЖ145	1100	900	45	18	—
Haynes 188	1100	900	45	15	—

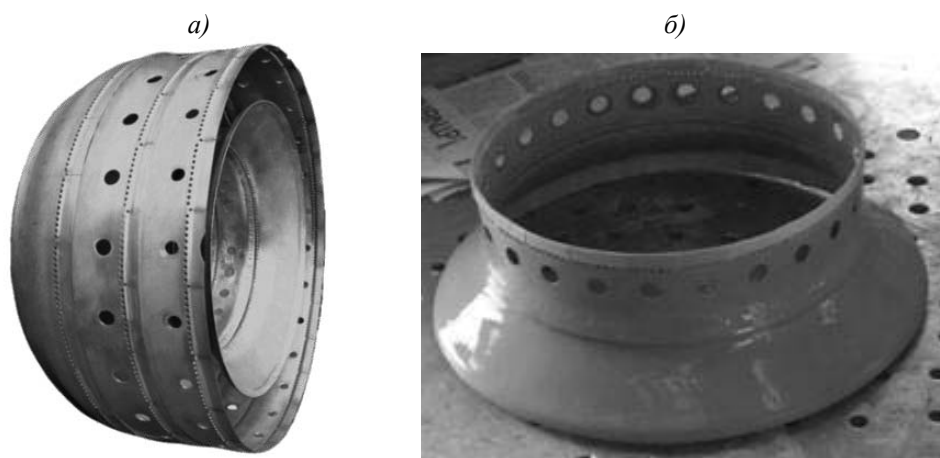


Рис. 7. Жаровая труба из сплава ВЖ171: а – общий вид;  
б – сегмент жаровой трубы с нанесенным покрытием ВЭС-104М

Во ФГУП «ВИАМ» проведены работы по опробованию сплава ВЖ171 для вертолетного двигателя ВК-2500М разработки АО «Климов». Изготовлена партия листового проката из сплава ВЖ171, отработаны технологии аргоно-дуговой и контактной точечной сварки для изготовления деталей жаровой трубы, а также определены расчетные значения характеристик прочности для основных деталей двигателя в соответствии с Программой испытаний и РЦ АП 33.15-1. На машиностроительном предприятии АО «Климов» проведены опытно-технологические работы по изготовлению деталей жаровой трубы из сплава ВЖ171. Жаровая труба прошла химико-термическую обработку во ФГУП «ВИАМ», после этого в АО «Климов» осуществлена окончательная сборка и нанесение жаростойкого стеклокерамического покрытия ВЭС-104М, разработанного для использования со сплавом ВЖ171 в составе жаровой трубы (рис. 7). Проведено опробование сварного узла (жаровой трубы) из сплава ВЖ171 с жаростойким стеклокерамическим покрытием в условиях АО «Климов», в том числе проведены огневые испытания в составе камеры сгорания на стационарном режиме.

На основании проведенного опробования сплав ВЖ171 с жаростойким стеклокерамическим покрытием ВЭС-104М рекомендован предприятием АО «Климов» для серийного изготовления жаровых труб вертолетных двигателей. Применение сплава ВЖ171 обеспечивает возможность повышения рабочей температуры стенки жаровой трубы на 200°С, по сравнению с применяемым для жаровой трубы двигателя ВК-2500 серийным сплавом ЭП648 с максимальной рабочей температурой 1000°С.

## Заключение

Работы, проведенные во ФГУП «ВИАМ» в период 2012–2017 гг. в области разработки и промышленного освоения новых высокожаропрочных материалов, обеспечили их применение для деталей и узлов перспективных ГТД: турбин, компрессоров высокого давления, камер сгорания.

## 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. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Новый жаропрочный никелевый сплав для дисков ГТД и ГТУ // Материаловедение. 2010. №7. С. 23–29.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
4. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных ГТД и ГТУ // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 98–103.
5. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 52–57.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 129–141.
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. 2013. №10–11. С. 23–32.
8. Овсепян С.В., Ломберг Б.С., Григорьева Т.Н., Бакрадзе М.М. Жаропрочный деформируемый свариваемый сплав для деталей ГТД с низким температурным коэффициентом линейного расширения // Металлург. 2013. №7. С. 61–65.
9. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства

- жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
10. Овсепян С.В., Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С., Ахмедзянов М.В. Современные жаропрочные деформируемые никелевые сплавы ВИАМ для деталей ГТД // Современные жаропрочные деформируемые никелевые и интерметаллидные сплавы, методы их обработки: сб. матер. конф. М.: ВИАМ. 2015, Доклад №1.
  11. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 25–30.
  12. Жаропрочный деформируемый сплав на основе никеля и изделие, выполненное из этого сплава: пат. 2571674 Рос. Федерация; опубл. 25.11.14.
  13. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Тимофеева О.Б. Особенности технологии диффузионной пайки жаропрочного сплава ЭП975 и литейного монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА-4У применительно к конструкции блиск // Сварочное производство. 2013. №7. С. 19–25.
  14. Овсепян С.В., Базылева О.А., Летников М.Н., Аргинбаева Э.Г. Расчет стабильности неразъемного соединения жаропрочных никелевого и интерметаллидного сплавов // Вопросы материаловедения. 2014. №2. С. 155–162.
  15. Ломберг Б.С., Мазалов И.С., Быков Ю.Г., Докашев В.В. Особенности технологии изготовления сварных кольцевых конструкций из высокопрочного сплава ВЖ172 // Сварочное производство. 2014. №2. С. 8–13.
  16. Способ изготовления ротора турбины из никелевого жаропрочного сплава: пат. 2571673 Рос. Федерация; опубл. 25.11.15.