

УДК 620.172.254

С.А. Голынец<sup>1</sup>, М.А. Горбовец<sup>1</sup>, В.А. Каранов<sup>1</sup>

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-86-94

*Как известно, для испытаний на кратковременную и длительную прочность жаропрочных титановых и никелевых сплавов, применяемых для лопаток и дисков компрессора, в основном используются стандартные образцы диаметром 5 мм и расчетной длиной 25 мм.*

*В конструкции газотурбинных двигателей применяются лопатки небольших размеров, что вызывает необходимость проведения контроля материала этих лопаток на малых образцах диаметром 3 мм и расчетной длиной 15 мм.*

*Данная работа посвящена оценке влияния размеров образцов на характеристики кратковременной и длительной прочности жаропрочных титановых сплавов VT3-1, VT9, VT18 и никелевых сплавов ВЖЛ12У, ЖС6У.*

**Ключевые слова:** титановые сплавы, никелевые сплавы, размер образцов, кратковременная прочность, длительная прочность, механические свойства.

S.A. Golinets<sup>1</sup>, M.A. Gorbovets<sup>1</sup>, V.A. Karanov<sup>1</sup>

## EFFECT OF SAMPLES PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT TITANIUM AND NICKEL ALLOYS

*As is well known, for tension test and stress-rupture test of titanium alloys applying to compressor blades and discs, in most cases are used the standard samples with 5 mm diameter and 25 mm gauge length.*

*In a construction of gas turbine engines are applied the compressor blades of the small sizes made of fine dimensional stampings that causes the necessity of monitoring procedure of material of these compressor blades on small samples with a diameter of 3 mm and gage length of 15 mm.*

*This work is devoted to effect of samples parameters on short-term strength and stress-rupture characteristics of heat-resistant titanium alloys VT3-1, VT9, VT18 and nickel alloys VGL12U, GS6U.*

**Keywords:** titanium alloys, nickel alloys, samples parameters, tension test, stress-rupture, mechanical properties.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Во всем мире в течение достаточно длительного времени наблюдается устойчивая тенденция увеличения доли жаропрочных титановых и никелевых сплавов в конструкциях авиационной техники всех типов и назначений [1–3].

Жаропрочные титановые и никелевые сплавы широко применяются для изготовления деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), включая рабочие лопатки компрессора. Так, для лопаток компрессора низкого давления, как правило, применяют двухфазные титановые сплавы ВТ3-1, ВТ6, ВТ8, ВТ9, работоспособные при температурах до 350–500°C [4, 5]. Для лопаток ступеней компрессора высокого давления (КВД), где возрастают рабочие температуры, применяют более жаропрочные псевдо- $\alpha$ -титановые сплавы типа ВТ18 или жаропрочные стали [6, 7]. В настоящее время рассматривается возможность применения рабочих лопаток КВД из материалов на основе интерметаллидов титана [8]. Большинство рабочих и сопловых лопаток авиационных ГТД, а также стационарных газотурбинных установок (ГТУ) отливают из литейных жаропрочных никелевых сплавов, основы создания производства и применения которых в авиации заложены академиком С.Т. Кишкиным [9, 10].

В качестве объектов исследования выбраны жаропрочные титановые сплавы различных классов: ВТ3-1, ВТ9, ВТ18 и никелевые литейные жаропрочные сплавы ВЖЛ12У, ЖС6У.

Двухфазный титановый сплав ВТ3-1 относится к системе легирования Ti–Al–Mo–Cr–Fe–Si. Количество стабильной  $\beta$ -фазы в сплаве после стандартного изотермического отжига составляет ~14% [11].

Сплав ВТ9 относится к двухфазным титановым сплавам системы Ti–Al–Mo–Zr–Si. Содержание стабильной  $\beta$ -фазы в сплаве ВТ9 в отожженном состоянии находится на уровне 9%.

Сплавы ВТ3-1 и ВТ9 применяют для изготовления лопаток и дисков газотурбинных двигателей типа Д30, АЛ-31Ф, Д18 и др.

Сплав ВТ18 относится к классу псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов и имеет наименьшее количество  $\beta$ -фазы среди жаропрочных титановых сплавов – на уровне 1,5%. Особенностью сплава ВТ18 системы Ti–Al–Zr–Mo–Nb–Si является наибольшее содержание алюминия ( $\alpha$ -стабилизатора) и циркония, что приводит к образованию интерметаллидной фазы  $Ti_3Al$  [12].

Жаропрочные никелевые сплавы ВЖЛ12У и ЖС6У представляют собой твердые растворы на основе никеля с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой, упрочненные выделениями  $\gamma'$ -фазы на основе интерметаллида  $Ni_3Al$  с упорядоченной ГЦК кристаллической решеткой. Высокая жаропрочность этих сплавов определяется большой объемной долей и высокой дисперсностью выделений  $\gamma'$ -фазы, образующихся при термической обработке пересыщенного  $\gamma$ -твердого раствора на основе никеля. Эти сплавы представляют собой чрезвычайно сложные и точно сбалансированные по химическому и фазовому составу системы, в которые целенаправленно вводятся до 15 легирующих элементов.

Первые отечественные серийные литейные жаропрочные сплавы ЖС6У и ВЖЛ12У разработаны в ВИАМ в 1950–1970-х гг. Это позволило создать литые охлаждаемые турбинные лопатки с равноосной структурой и открыть перспективы в решении ключевой проблемы авиационного двигателестроения – повышении рабочей температуры газа. Следует отметить, что в тот период температура газа на входе в турбину составляла 1200 К, тогда как к настоящему времени она возросла до 1800–1950 К, в том числе благодаря применению новых литейных жаропрочных сплавов и переходу от равноосной к направленной кристаллизации, т. е. созданию в отливках лопаток столбчатой структуры зерен. Это позволило повысить их характеристики жаропрочности, пластичности и термостойкости [13].

Расчеты запаса прочности и прогнозирование ресурса рабочих и сопловых лопаток турбины авиационных ГТД и наземных ГТУ основаны на результатах квалификационных

испытаний жаропрочных титановых и никелевых сплавов. Механические характеристики сплавов в диапазоне температурно-силовых условий эксплуатации турбинных лопаток определяют на образцах, заготовки которых получают по технологии производства лопаток, а изготовление образцов и их испытания осуществляют согласно требованиям государственных и международных стандартов.

Механические характеристики жаропрочных титановых и никелевых сплавов при комнатной и повышенной температурах, представленные в отраслевых стандартах и технических условиях, определены на образцах с диаметром рабочей части 5 мм.

В связи с тем, что с изменением размеров рабочего сечения испытываемого образца меняется соотношение его поверхности к объему, необходимо учитывать влияние масштабного фактора на прочностные характеристики сплавов при расчетах запасов прочности конструкции ГТД и ГТУ. Существенное снижение длительной прочности жаропрочных никелевых сплавов с уменьшением поперечного сечения рабочей зоны отмечено в работе зарубежных исследователей [14]. Наиболее интенсивное снижение длительной прочности при уменьшении толщины рабочего сечения образцов с 4,5 до 3 мм наблюдается у жаропрочных сплавов с равноосной кристаллической структурой (до 20%) и в меньшей степени снижение этой характеристики наблюдается у сплавов с монокристаллической структурой (до 10%).

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

### Материалы и методы

Исследованию подвергали титановые сплавы ВТ3-1, ВТ9, ВТ18 и никелевые сплавы ВЖЛ12У, ЖС6У. Отобраны катаные прутки  $\varnothing 35$  мм из сплава ВТ3-1 (плавка 1), катаные прутки  $\varnothing 25$  мм из сплавов ВТ9 (плавки 2 и 3) и ВТ18 (плавки 4 и 5), полученные в условиях промышленного производства.

Заготовки под образцы вырезали из середины радиуса круга прутка в продольном направлении: из прутка  $\varnothing 35$  мм – четыре заготовки (две – для стандартных образцов  $\varnothing 5$  мм; две – для образцов  $\varnothing 3$  мм). Из прутка  $\varnothing 25$  мм вырезали две заготовки: одна – для образца  $\varnothing 5$  мм и одна – для образца  $\varnothing 3$  мм. Из пластин–«свидетелей», полученных при штамповке лопаток, также изготавливали заготовки под образцы диаметрами 3 и 5 мм.

Термическую обработку заготовок проводили по следующим режимам:

– для сплава ВТ3-1 – отжиг при 870°C в течение 1 ч, охлаждение с печью, выдержка в течение 2 ч, охлаждение на воздухе;

– для сплава ВТ9 – отжиг при 950–970°C в течение 1 ч, охлаждение на воздухе, отжиг при 530°C в течение 6 ч, охлаждение на воздухе;

– для сплава ВТ18 – отжиг при 900°C в течение 1 ч, охлаждение на воздухе.

Химический состав, механические свойства и структура исследованных сплавов удовлетворяли техническим условиям.

Сплавы ЖС6У-ВИ и ВЖЛ12У-ВИ в виде литых прутковых заготовок изготовлены во ФГУП «ВИАМ» на научно-производственном комплексе по изготовлению жаропрочных никелевых сплавов. Данный комплекс включает ряд отдельных участков, оборудованных современным производственным, аналитическим и испытательным оборудованием, что позволяет обеспечить качество изготавливаемой продукции на уровне требований мировых стандартов [16].

Технология получения заготовок из литейных жаропрочных сплавов ЖС6У и ВЖЛ12У включала следующие операции: подготовка шихтовых материалов, выплавка

сплава в вакуумной индукционной печи, контроль химического состава литой прутковой заготовки, отливка заготовок под образцы для контроля механических свойств, термическая обработка заготовок, изготовление образцов для проведения механических испытаний.

Данная технология обеспечивает: повышенную чистоту сплавов по газам (кислороду и азоту), примесям (свинцу, висмуту, сере, кремнию и др.) и неметаллическим включениям; получение стабильного химического состава сплавов в узких пределах; высокие и стабильные жаропрочные и механические свойства сплавов, которые сохраняются после длительной эксплуатации деталей; полное использование при плавке всех образующихся отходов без снижения качества сплавов, что позволяет снизить стоимость сплавов и сэкономить дорогостоящие металлы.

Для выплавки сплавов использовали следующие шихтовые материалы: никель, кобальт, хром, вольфрам, молибден, алюминий, титан, ниобий, ванадий, цирконий, лигатуры «никель–бор», «никель–РЗМ (лантан, церий, иттрий)», отходы литейные и собственные. Отходы полностью очищали от формовочных керамических материалов, краски от люм-контроля и цветной дефектоскопии, маслянистых и других веществ. Перед плавкой все шихтовые материалы, в том числе и отходы, проходили сушку при температуре 200–300°C в течение 3 ч.

Выплавку сплава проводили в вакуумной индукционной печи VIM-50 производства фирмы ALD с емкостью плавильного тигля 350 кг. В тигель загружали никель, кобальт, хром, вольфрам, молибден, ванадий, затем их расплавляли и в расплав последовательно присаживали углерод, титан, ниобий, алюминий. После каждой добавки расплав перемешивали с помощью электромагнитного поля. В конце плавки присаживали цирконий, лигатуры «никель–бор» и «никель–РЗМ». Расплав разливали в стальные трубы с внутренним диаметром 90 мм. Полученные литые прутковые заготовки подвергали механической обработке. Отливку заготовок под образцы проводили в вакуумной порционной печи. Заготовку расплавляли под вакуумом  $10^{-2}$  мм рт. ст. (1,33 Па), расплав рафинировали 1–2 мин, замеряли температуру расплава, которая составляла 1520°C, затем расплав заливали в горячую керамическую форму. Форму выдерживали под вакуумом в печи 5 мин и охлаждали на воздухе, далее заготовки под образцы были переданы на термическую обработку.

Термическую обработку проводили в муфельных нагревательных печах по режимам:

- для сплава ЖС6У – нагрев до  $1210 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе;
- для сплава ВЖЛ12У – без термической обработки.

По химическому составу и механическим свойствам исходные плавки сплавов ВЖЛ12У (плавка 6) и ЖС6У (плавка 7) удовлетворяли требованиям технических условий.

В соответствии с ГОСТ 1497, ГОСТ 9651 и ГОСТ 10145 из заготовок сплавов ВТ3-1, ВТ9, ВТ18, ВЖЛ12У и ЖС6У изготовлены образцы диаметрами 5 и 3 мм для проведения механических испытаний. Чертежи образцов диаметрами 3 и 5 мм для испытаний на растяжение и длительную прочность приведены на рис. 1.

Испытания на растяжение и длительную прочность образцов из сплавов ВТ3-1, ВТ9, ВТ18, ВЖЛ12У и ЖС6У проводили на испытательной машине КАРРА 50DS [17, 18]. Методика проведения испытаний соответствовала ГОСТ 1497, ГОСТ 9651 и ГОСТ 10145. Режимы испытаний на растяжение и длительную прочность сплавов ВТ3-1, ВТ9, ВТ18, ВЖЛ12У и ЖС6У приведены в табл. 1.

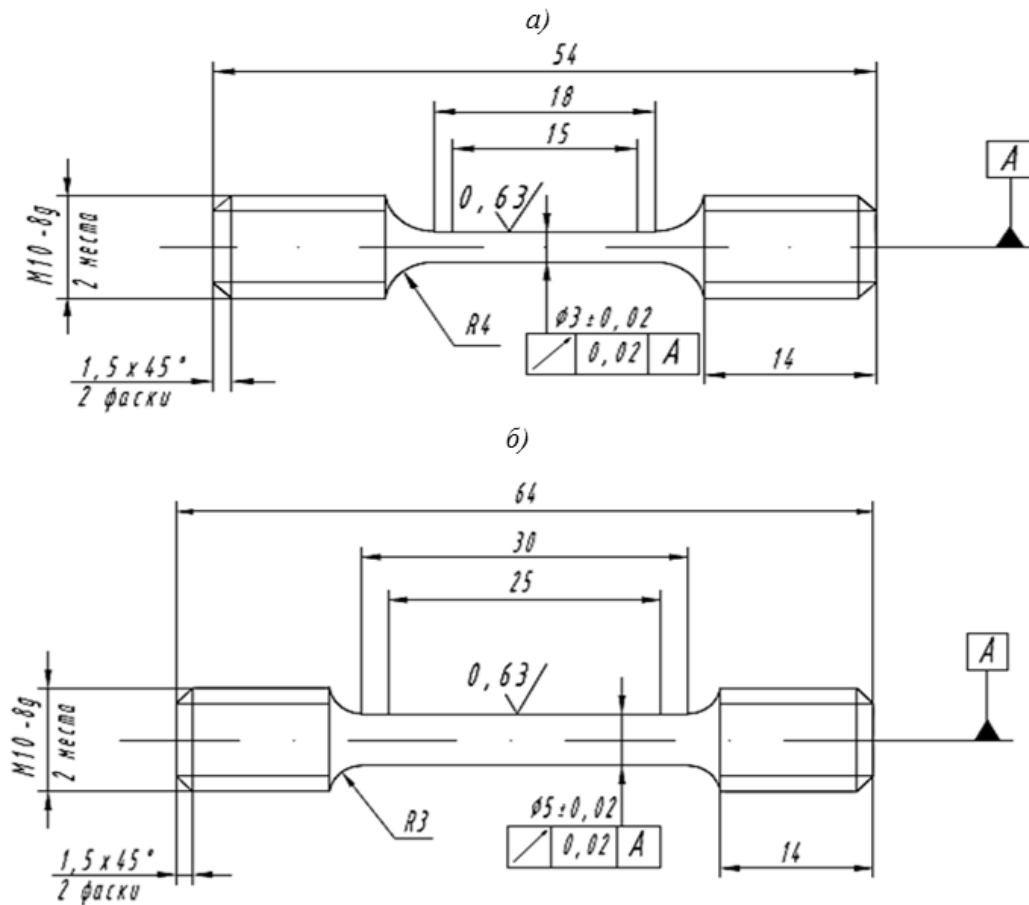


Рис. 1. Образцы диаметрами 3 (а) и 5 мм (б) для испытаний на растяжение и длительную прочность

Таблица 1

**Режимы испытаний на растяжение и длительную прочность сплавов ВТЗ-1, ВТ9, ВТ18, ВЖЛ12У, ЖС6У**

Сплав	Растяжение при температуре испытания $T_{исп}$ , °С	Длительная прочность	
		$T_{исп}$ , °С	Напряжение, МПа
ВТЗ-1	20 и 450	450	640
ВТ9	20 и 500	500	640
ВТ18	20 и 600	600	275
ВЖЛ12У	20	975	196
ЖС6У	20	975	226

**Результаты и обсуждение**

Проведены испытания на растяжение при температурах 20, 450, 500, 600°С и длительную прочность при температурах 450, 500, 600, 975°С образцов из сплавов ВТЗ-1, ВТ9, ВТ18, ВЖЛ12У и ЖС6У. Для каждого сплава, вида полуфабриката и температурного уровня испытывали по 5 образцов на каждый вид испытаний. Средние значения предела прочности, относительного удлинения и относительного сужения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения предела прочности ( $\sigma_b$ ), относительного удлинения ( $\delta$ ) и относительного сужения ( $\psi$ ) сплавов ВТЗ-1, ВТ9, ВТ18, ВЖЛ12У, ЖС6У

Сплав	Условный номер плавки	Вид полуфабриката	Диаметр образца, мм	$T_{исп}$ , °С	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$	$\psi$	
						%		
ВТЗ-1	1	Пруток	5	20	1050	14,5	36	
			3		1040	15,5	42	
			5	450	760	19,5	56	
		3	760		20,5	55		
		Пластина-«свидетель»	5	20	1060	16	43	
			3		1060	16,5	43	
	5		450	770	20	61		
	3	770		20	60			
	ВТ9	2	Пруток	5	20	1120	17,5	48
				3		1160	16,5	49
5				500	835	21,5	73	
3					835	22,5	72	
Пластина-«свидетель»			5	20	1070	18	48	
			3		1070	16	48	
			5	500	775	22	71	
			3		785	21	70	
3		Пруток	5	20	1165	14,5	47	
			3		1185	14	45	
		Пластина-«свидетель»	5	20	1175	15	44	
			3		1165	16	46	
			5	500	855	19	65	
			3		855	19	65	
ВТ18	4	Пруток	5	20	1040	18,5	35	
			3		1020	18,5	35	
			5	600	700	23	46	
		3	690		23,5	52		
		Пластина-«свидетель»	5	20	1070	18,5	32	
			3		1070	19	33	
	5	Пруток	5	20	990	20	47	
			3		1040	20	46	
			5	600	650	28	50	
			3		670	28	52	
		Пластина-«свидетель»	5	20	1070	17,5	41	
			3		1060	17	41	
			5	600	680	29	55	
			3		660	29	59	
ВЖЛ12У	6	Литая заготовка	5	20	960	8,3	12	
			3		950	7,2	12,5	
ЖС6У	7	Литая заготовка	5	20	980	6	10	
			3		970	5,5	11	

Средние значения времени до разрушения и относительного изменения времени до разрушения представлены в табл. 3.

Средние значения времени до разрушения сплавов ВТ3-1, ВТ9, ВТ18, ВЖЛ12У, ЖС6У

Сплав	Условный номер плавки	Вид полуфабриката	Диаметр образца, мм	$T_{исп}$ , °С	$\sigma$ , МПа	$\tau_p$ , ч	Относительное изменение времени до разрушения, %
ВТ3-1	1	Пруток	5	450	640	291	100
			3			189	65
		Пластина-«свидетель»	5			148	100
			3			95	65
ВТ9	2	Пруток	5	500	640	109	100
			3			88	80
		Пластина-«свидетель»	5			119	100
			3			94	75
	3	Пруток	5			211	100
			3			148	70
		Пластина-«свидетель»	5			198	100
			3			175	89
ВТ18	4	Пруток	5	600	275	106	100
			3			81	76
		Пластина-«свидетель»	5			112	100
			3			76	67
	5	Пруток	5			133	100
			3			95	71
		Пластина-«свидетель»	5			96	100
			3			82	85
ВЖЛ12У	6	Литая заготовка	5	975	196	64	100
			3			59	92
ЖС6У	7	Литая заготовка	5	975	226	54	100
			3			38	70

Полученные результаты свидетельствуют, что уменьшение диаметра образцов исследуемых жаропрочных титановых и никелевых сплавов с 5 до 3 мм не приводит к снижению прочностных характеристик при комнатной и повышенной температуре при испытаниях на растяжение.

Значения предела прочности ( $\sigma_b$ ), относительного удлинения ( $\delta$ ) и относительного сужения ( $\psi$ ) образцов диаметрами 3 и 5 мм практически одинаковы (табл. 2).

Испытания на длительную прочность показали значительное снижение времени до разрушения образцов исследуемых жаропрочных титановых и никелевых сплавов при уменьшении диаметра с 5 до 3 мм (табл. 3, рис. 2):

- для сплава ВТ3-1 – пруток и пластина-«свидетель» 35%;
- для сплава ВТ9 – пруток до 30%, пластина-«свидетель» до 25%;
- для сплава ВТ18 – пруток до 29%, пластина-«свидетель» до 33%;
- для сплава ВЖЛ12У – литая заготовка 8%;
- для сплава ЖС6У – литая заготовка 30%.

Снижение времени до разрушения образцов  $\varnothing 3$  мм (по сравнению с образцами  $\varnothing 5$  мм) может быть связано с образованием и развитием трещин непосредственно на рабочей поверхности. Эта особенность обусловлена участием окислительной атмосферы в процессе структурной повреждаемости жаропрочных сплавов в условиях ползучести, а также плосконапряженным состоянием поверхности образцов, способствующим развитию процессов высокотемпературной пластической деформации.

Следует отметить, что результаты выполненных испытаний согласуются с данными зарубежных исследователей [14].

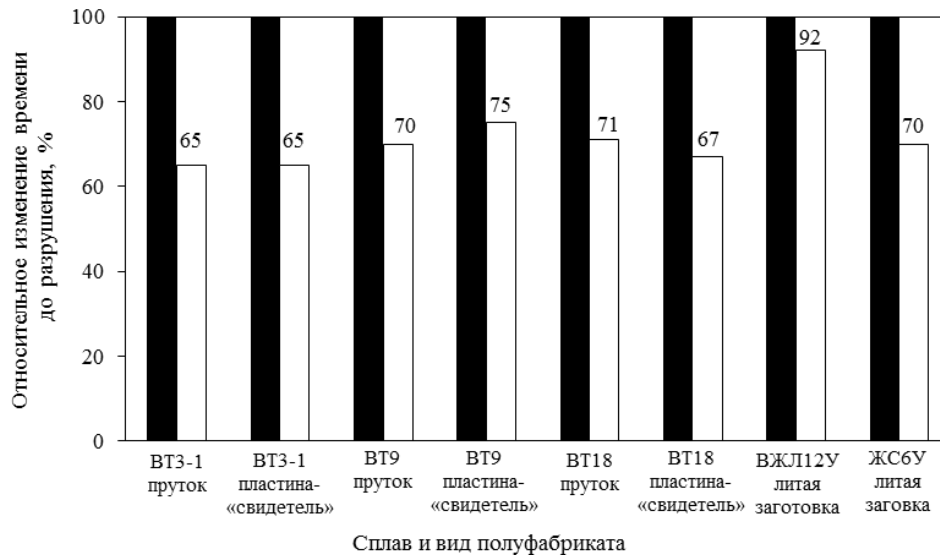


Рис. 2. Диаграмма относительного изменения времени до разрушения образцов диаметрами 3 (□) и 5 мм (■) сплавов VT3-1, VT9, VT18, ВЖЛ12У, ЖС6У

### Заключения

1. Исследовано влияние размеров образцов на механические свойства при растяжении жаропрочных титановых и никелевых сплавов.

2. В результате выполненных исследований установлено, что жаропрочные титановые сплавы VT3-1, VT9, VT18 и никелевые сплавы ВЖЛ12У, ЖС6У не проявляют чувствительности к уменьшению диаметра образцов с 5 до 3 мм при испытаниях на растяжение как при комнатной, так и при повышенной температуре испытаний.

3. Установлено, что уменьшение диаметра образцов с 5 до 3 мм сопровождается снижением времени до разрушения сплавов VT3-1, VT9, VT18, ЖС6У – до 35%. Менее чувствительным к изменению диаметра образцов с 5 до 3 мм оказался жаропрочный никелевый сплав ВЖЛ12У. Снижение времени до разрушения составило всего 8%.

4. Проведение испытаний на длительную прочность на образцах разного размера может привести к результатам, не удовлетворяющим требованиям технических условий и отраслевых стандартов, поэтому необходима строгая регламентация типа образца при проведении приемо-сдаточных испытаний.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
2. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
3. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // *Современные титановые сплавы и проблемы их развития*: сб. М.: ВИАМ, 2010. С. 43–46.
4. Кресанов Ю.С., Качан А.Я., Чигиринский В.В., Бень А.Н. Влияние параметров горячего выдавливания заготовок рабочих лопаток компрессора на качество их изготовления // *Вестник двигателестроения*. 2009. №2. С. 108–115.
5. Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д. и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Запорожье: Мотор Сич, 2003. Ч. 1: Лопатки компрессора и вентилятора. 420 с.

6. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №2. С. 8–14.
7. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо- $\alpha$ -титанового сплава VT41 // *Титан*. 2016. №2 (52). С. 33–42.
8. Гейкин В.А. Разработка технологий для новых материалов в двигателестроении // *Двигатель*. 2017. №3. С. 10–11.
9. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *75 лет. Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 2007. С. 27–44.
10. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е. *Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технология и оборудование / под общ. ред. Е.Н. Каблова*. М.: ВИАМ, 2016. С. 10–11.
11. Солонина О.П., Глазунов С.Г. *Жаропрочные титановые сплавы*. М.: *Металлургия*, 1976. 448 с.
12. Попов А.А., Попова М.А. Изотермические диаграммы выделения силицидных и алюминидных фаз в жаропрочных титановых сплавах // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2016. №11 (737). С. 23–28.
13. Особенности эксплуатации литейных жаропрочных никелевых сплавов и предъявляемые к ним требования // *Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова*. 2-е изд. М.: *Наука*, 2006. С. 19–34.
14. Duhl D.N. *Directionally solidified superalloys // Superalloys II*. N.Y.: Wiley-Interscience, 1987. P. 189–214.
15. 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.
16. Горюнов А.В., Ригин В.Е. Современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 3–7. DOI: 18577/2071-9140-2014-0-2-3-7.
17. Соловьев А.Е., Голынец С.А., Хвацкий К.К., Асланян И.Р. Проведение статических испытаний при растяжении на машинах фирмы Zwick/Roell // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №8. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-12-12.
18. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.