

УДК 629.7.063.3

Н.П. Великанова¹, П.Г. Великанов¹, А.С. Киселев²¹*Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева «КАИ»*²*ОАО КПП «Авиамотор»*

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАРАБОТКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ДЛЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН АВИАЦИОННЫХ ГТД

На основе результатов испытаний по ГОСТ 10145-81 «Металлы. Метод испытания на длительную прочность» был проведен анализ влияния эксплуатационной наработки на характеристики длительной прочности жаропрочного сплава для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД. В рамках статистического анализа были решены следующие задачи: определение числовых характеристик для выборок с разным уровнем наработки; определение закона распределения характеристик жаропрочности; определение влияния эксплуатационной наработки на закон и числовые характеристики распределений. В результате были предложены модели для оценки ресурса рабочих лопаток турбин авиационных ГТД как при проектировании, так и при индивидуальной оценке ресурса.

Ключевые слова: ресурс, двигатель, лопатка, температура, турбина, сплав ЖС30-ВИ, жаропрочность.

Введение

При эксплуатации летательных аппаратов на трассах различной протяженности длительность основных режимов работы газотурбинных двигателей изменяется в широких пределах, причем это изменение имеет случайный характер. На каждом режиме работы двигателей уровни действующих на конструктивные элементы нагрузок и температур являются случайными величинами, что обусловлено полетами в различных климатических зонах и на различных высотах, изменчивостью атмосферных условий, точностью систем автоматического регулирования двигателей и многими другими причинами.

На наиболее нагруженных режимах работы двигателей в рабочих лопатках газовых турбин под действием высоких температур и напряжений от центробежных и газовых сил возникают повреждения, которые при отсутствии других причин приводят к разрушению лопаток вследствие их недостаточной длительной прочности.

Объектом исследования в данной работе является рабочая лопатка первой ступени турбины двигателя НК-86А. Материал лопатки – литейный жаропрочный сплав ЖС30-ВИ монокристаллической структуры.

К характеристикам длительной прочности кроме предела длительной прочности относится также жаропрочность материала – время до разрушения при данном напряжении и температуре. В производственных условиях обычно проводят испытания именно на жаропрочность. Для того

чтобы оценить предел длительной прочности рабочих лопаток турбин авиационных ГТД в зависимости от эксплуатационной наработки, был проведен анализ влияния эксплуатационной наработки на жаропрочность сплава для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД по результатам испытаний, а затем осуществлялся переход к пределу длительной прочности.

1. Условия испытаний

Испытания образцов проводились в соответствии с ГОСТ 10145-81 «Металлы. Метод испытания на длительную прочность». Для проведения испытаний использовалась испытательная машина МПЗ, точность измерения температуры которой составляет ± 2 °С, а точность прилагаемой нагрузки – $\pm 0,5\%$ от прилагаемой нагрузки.

Исходный уровень долговечности оценивался по результатам испытаний образцов, вырезанных из холодной зоны лопаток, в которой структура металла не претерпевает изменений, а также вырезанных из «образцов-свидетелей». Уровень долговечности сплава ЖС30-ВИ после наработки в эксплуатации оценивался по результатам испытаний образцов, вырезанных из горячей зоны пера лопатки, где особенно сказывается влияние наработки.

В качестве номинального температурного уровня использовалась температура $T = 1248$ К, близкая к расчетной температуре, которая имеет место в наиболее опасном сечении. В качестве но-

минального уровня действующих напряжений использовался уровень в 260 МПа для сплава ЖС30-ВИ. Испытание проводилось до разрушения образца. В результате испытаний получились наборы экспериментальных данных времени до разрушения, которые были подвергнуты статистической обработке. Статистический анализ включал в себя установление закона распределения и проверку принадлежности выборок к одной генеральной совокупности.

2. Статистический анализ данных времени до разрушения

Для проверки вида закона распределения долговечности после наработки использовался графический метод и критерий Шапиро-Уилка и Пирсона [1]. Графики, построенные на нормальной вероятностной бумаге, достаточно хорошо аппроксимируются прямыми линиями, что свидетельствует о том, что закон распределения долговечности логарифмически нормальный (рис. 1-4).

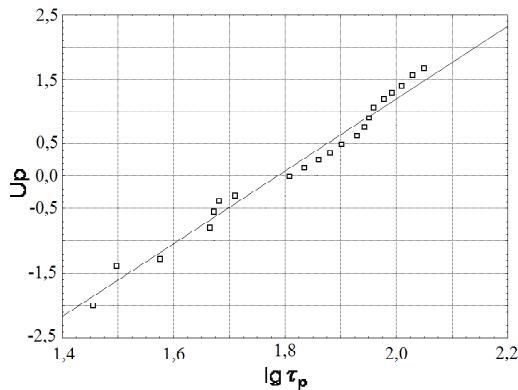


Рис. 1. График эмпирического распределения десятичного логарифма исходной долговечности D_p исх сплава ЖС30-ВИ

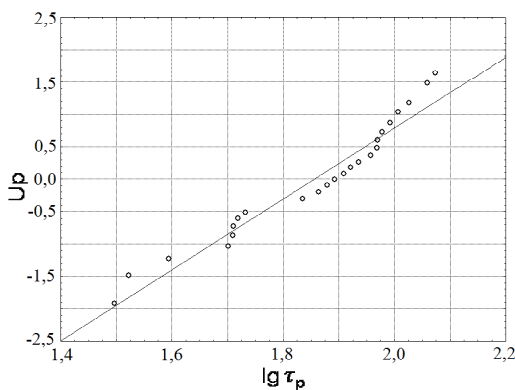


Рис. 2. График эмпирического распределения десятичного логарифма долговечности D_p сплава ЖС30-ВИ после эксплуатационной наработки в пределах от 500 до 3500 часов

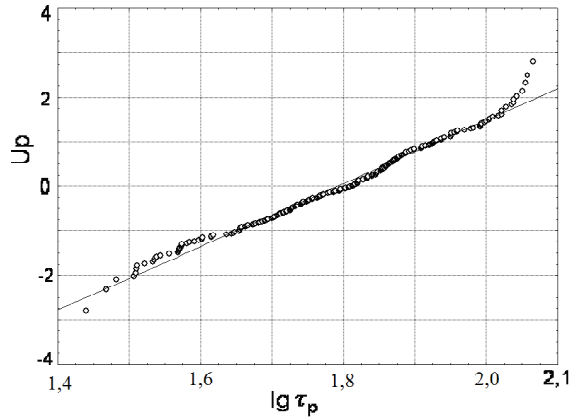


Рис. 3. График эмпирического распределения десятичного логарифма долговечности D_p сплава ЖС30-ВИ после эксплуатационной наработки в пределах от 3500 до 5500 часов

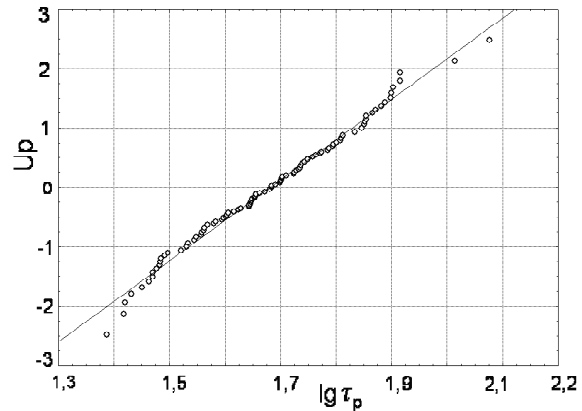


Рис. 4. График эмпирического распределения десятичного логарифма долговечности D_p сплава ЖС30-ВИ после эксплуатационной наработки в пределах от 5500 до 9500 часов

Проверка соответствия опытных данных логарифмически нормальному закону распределения по критериям Пирсона (табл. 2) и Шапиро-Уилка (табл.1) [1] показала, что закон распределения рассматриваемых характеристик до и после наработки является логарифмически нормальным при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Таблица 1
Проверка нормальности распределения по критерию Шапиро-Уилка

Наработка τ , ч	Характеристики распределения		$W_{расч}$	$W_{0,05}$	H_0
	$\lg \tau_p$	$S_{\lg \tau_p}$			
0	1,929	0,174	0,933	0,914	+
500-3500	1,856	0,167	0,928	0,916	+

Таблица 2
Проверка нормальности распределения по критерию Пирсона

Наработка τ , ч	Характеристики распределения		$\chi^2_{расч}$	$\chi^2_{0,05}$	H_0
	$\lg \tau_p$	$S_{\lg \tau_p}$			
3500-5500	1,791	0,138	18,73	21	+
5500-9500	1,682	0,144	13,26	14,1	+

Проверка по критерию Бартлетта (табл. 3) [1] показала, что для рабочих лопаток первой ступени двигателей НК-86А имеет место однородность дисперсий логарифмов.

Таблица 3
Проверка однородности дисперсий логарифмов долговечности

Параметр	Наработка	Дисп.	$\chi^2_{расч}$	$\chi^2_{0,05}$	H_0
$\lg \tau_p$	0	0,0302	4,12	5,99	+
	500-3500	0,0280			
	3500-5500	0,0192			
	5500-9500	0,0207			

Результаты дисперсионного анализа (табл. 4) [1] показали, что гипотеза об однородности средних значений логарифмов долговечностей для выборок во всех случаях отвергаются. Значит, эксплуатационная наработка рабочих лопаток рассматриваемых двигателей оказывает значимое влияние на среднее значение долговечности исследуемых сплавов.

Таблица 4
Проверка однородности средних значений логарифмов долговечности

Параметр	Объем выборки	Число степеней свободы		$F_{0,99}$	H_0
		K_1	K_2		
$\lg \tau_p$	408	3	404	3,83	-

Из сопоставления средних значений величин времени до разрушения следует, что в процессе наработки имеет место снижение $\lg \tau_p$, зависящее не только от наработки, но и от исходного уровня долговечности. Для количественной оценки снижения долговечности сплава ЖС30-ВИ была построена регрессионная зависимость:

$$\bar{\tau}_{p \tau} = \bar{\tau}_{p_{исх}}^{1-0,000012 \cdot \tau}, \quad (1)$$

где $\bar{\tau}_{p_{исх}}$ – среднее значение долговечности в исходном состоянии в часах; τ – наработка в часах.

3. Влияние эксплуатационной наработки на предел длительной прочности

На основе результатов оценки влияния эксплуатационной наработки на время до разрушения материала рабочих лопаток турбин была проведена оценка влияния эксплуатационной наработки на предел длительной прочности указанного материала. Эта проверка проводилась с использованием уравнения, предложенного Голубовским Е.Р., Труниным И.И. и Голубовой Н.Г. [2, 3]:

$$\lg \tau_p = -15,56 + 2 \lg T - 4 \lg \sigma + \frac{26986}{T} - \frac{3,04}{T} \sigma; \quad (2)$$

где τ_p – долговечность до разрушения, ч;
 T – температура, К;
 σ – предел длительной прочности, МПа.

После подстановки в это уравнение выражение (1) и выполнив необходимые преобразования, получим формулу, позволяющую вычислить предел длительной прочности Γ в зависимости от эксплуатационной наработки D при данной температуре T для исследуемого сплава. Это выражение примет вид:

$$\lg \tau_{p\tau} = (1 - 12 \cdot 10^{-6} \tau) \times (-15,56 + 2 \lg T - 4 \lg \sigma + \frac{26986}{T} - \frac{3,04}{T} \sigma); \quad (3)$$

На рис. 5 показана визуализация уравнения (3).

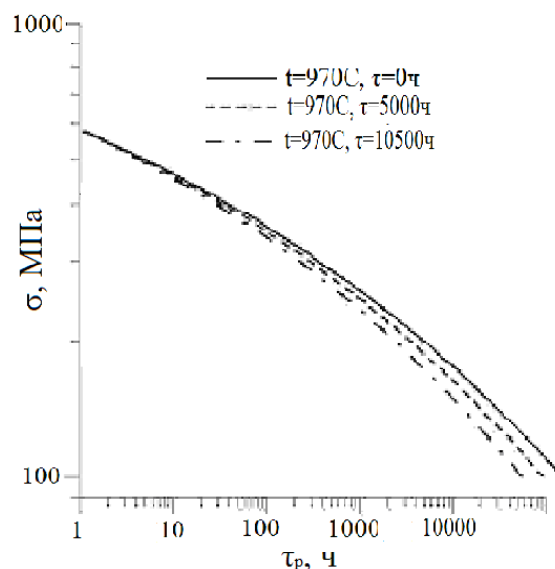


Рис. 5. Изменение предела длительной прочности σ сплава ЖС30-ВИ от долговечности τ_p при данных температуре t и наработке τ

Указанное уравнение является трансцендентным и точное аналитическое решение его относительно σ невозможно. Вычисление кривых в табличной форме можно осуществлять на ЭВМ с использованием метода Ньютона.

4. Статистический анализ данных предела длительной прочности

По полученной зависимости (3) был осуществлен пересчет имеющихся выборок времен до разрушения в выборки пределов длительной прочности (табл. 5). После этого полученные выборки были подвергнуты статистической обработке с целью установления закона распределения и проверки принадлежности выборок к одной генеральной совокупности.

Таблица 5

Числовые характеристики выборок $\sigma_{дл}$

$\tau, ч$	$\bar{\sigma}, МПа$	$S_{\sigma}, МПа$	S_{σ}^2
0	260,4	21,2	449,4
500-3500	256,49	19,6	384,46
3500-5500	253,52	16,54	273,61
5500-9500	249,8	18,05	326,15

Для проверки вида закона распределения предела длительной прочности после наработки использовался графический метод (рис. 6-9) и критерий Шапиро-Уилка.

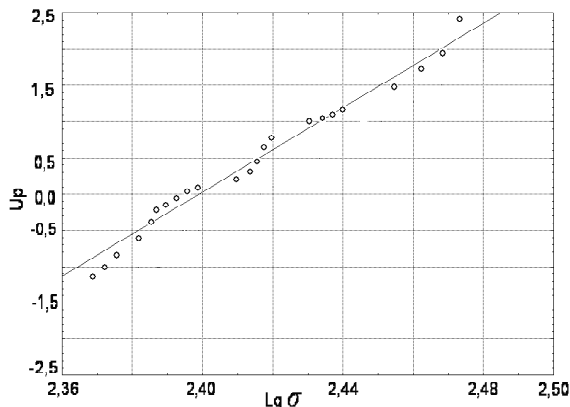


Рис. 6. График эмпирического распределения десятичного логарифма исходного $\sigma_{исх}$

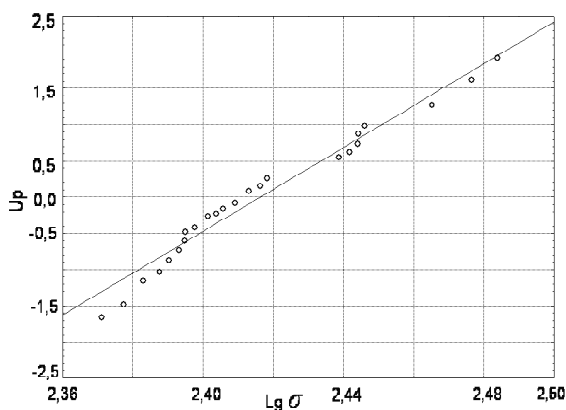


Рис. 7. График эмпирического распределения десятичного логарифма предела длительной прочности при $\tau = 500...3500 ч$

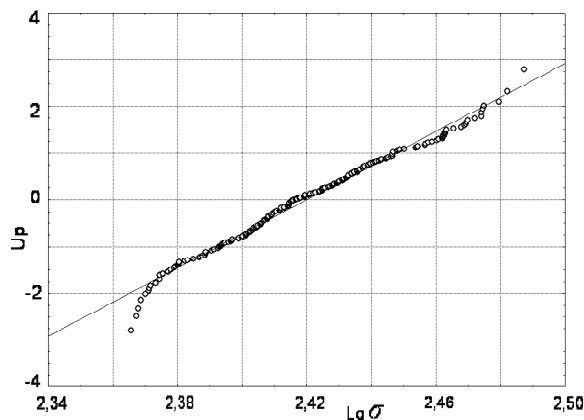


Рис. 8. График эмпирического распределения десятичного логарифма предела длительной прочности σ при $\tau = 3500...5500 ч$

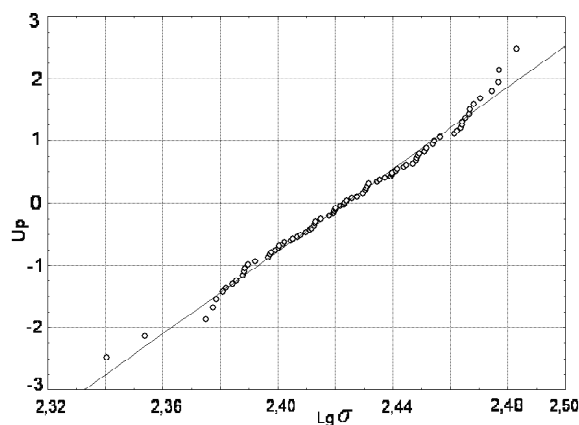


Рис. 9. График эмпирического распределения десятичного логарифма предела длительной прочности σ при $\tau = 5500...9500 ч$

Графики, построенные на нормальной вероятностной бумаге, достаточно хорошо аппроксимируются прямыми линиями, что свидетельствует о том, что закон распределения предела длительной прочности логарифмически нормальный.

Проверка соответствия полученных данных логарифмически нормальному закону распределения по критериям Пирсона (табл. 7) и Шапиро-Уилка (табл. 6) показала, что закон распределения предела длительной прочности до и после наработки является логарифмически нормальным при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Таблица 6

Проверка нормальности распределения логарифма предела длительной прочности по критерию Шапиро-Уилка

Наработка $\tau, ч$	Характеристики распределения		$W_{расч}$	$W_{0,05}$	H_0
	$\lg \bar{\sigma}$	$S_{\lg \sigma}$			
0	2,4156	0,0339	0,965	0,914	+
500-3500	2,4090	0,0317	0,944	0,916	+

Таблица 7

Проверка нормальности распределения логарифма предела длительной прочности по критерию Пирсона

Наработка τ , ч	Характеристики распределения		$\chi^2_{\text{расч}}$	$\chi^2_{0,05}$	H_0
	$\lg \sigma$	$S_{\lg \sigma}$			
3500-5500	2,4040	0,0270	17,64	21	+
5500-9500	2,3975	0,0296	12,11	14,1	+

Проверка по критерию Бартлета (табл. 8) показала, что для рабочих лопаток первой ступени двигателей НК-86А имеет место однородность дисперсий логарифмов предела длительной прочности.

Результаты дисперсионного анализа показали, что для всех исследуемых величин гипотеза об однородности средних значений логарифмов пределов длительной прочности для выборок во всех случаях отвергаются. Значит, эксплуатационная наработка рабочих лопаток рассматриваемых двигателей оказывает значимое влияние на среднее значение предела длительной прочности исследуемых сплавов.

Таблица 8

Проверка однородности средних значений логарифмов предела длительной прочности

Параметр	Объем выборки	Число степеней свободы		$F_{0,99}$	H_0
		K_1	K_2		
$\lg \sigma$	408	3	404	3,83	-

Зависимости (1) и (3) могут использоваться при оценке ресурса рабочих лопаток турбин авиационных ГТД как при проектировании, так и при индивидуальной оценке ресурса.

Перечень ссылок

1. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 400 с
2. Трунин И.И., Голубовский Е.Р., Голубова Н.Г. О возможности описания температурно-временной зависимости характеристик жаропрочности уравнениями одного типа. М.: Деп. СИФ НИИинформтяжмаш. 1974. (РЖ Механика. 1974. Реф. 9В960)
3. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов // М.: Машиностроение. 1998. – 464 с.

Поступила в редакцию 01.06.2011

Н.П. Великанова, П.Г. Великанов, О.С. Кисельов. Вплив експлуатаційної наробки на характеристики тривала міцність жароміцних сплавах для робочих лопаток турбін авіаційних ГТД

На основі результатів випробувань за ГОСТ 10145-81 «Метали. Метод випробування на тривалу міцність» був проведений аналіз впливу експлуатаційного напруження на характеристики тривалої міцності жароміцного сплаву для робочих лопаток турбін авіаційних ГТД. У рамках статистичного аналізу були вирішені наступні завдання: визначення числових характеристик для вибірок з різним рівнем напруження; визначення закону розподілу характеристик жароміцності; визначення впливу експлуатаційного напруження на закон і числові характеристики розподілів. У результаті були запропоновані моделі для оцінки ресурсу робочих лопаток турбін авіаційних ГТД як при проектуванні, так і при індивідуальній оцінці ресурсу.

Ключові слова: ресурс, двигун, лопатка, температура, турбіна, сплав ЖС30-В, жароміцність.

N.P. Velikanova, P.G. Velikanov, A.S. Kiselev. Influence of operational hours on the strength characteristics of long working for superalloys of turbine blade of gas turbine engines

Based on the results of tests according to GOST 10145-81 «Metals. Test method for long-term strength» analyzed the influence of operational developments on the characteristics of long-term strength of heat-resistant alloy for turbine blades of aircraft gas turbine engine. In the statistical analysis were solved the following problems: determination of numerical characteristics for samples with different levels of use, the definition of the distribution characteristics of heat resistance, determine the effect of operating time between the law and the numerical characteristics of the distributions. As a result of proposed models for estimating resource working blades of turbines gas turbine engines in both the design and at an individual assessment of the resource.

Key words: resource, engine, blade, temperature, turbine, alloy ZHS30-VI, heat resistance.