

Эксплуатационные закономерности расходования прочностных характеристик материала турбинных лопаток двигателей ГПА

Протасова Н.А.¹, Великанова Н.П.¹, Великанов П.Г.¹, Ахмадеев А.А.²

¹ КНИТУ - КАИ им. А.Н. Туполева, г. Казань

² ОАО «КМПО», г. Казань

e-mail: nprotasova@bk.ru

Выполнен анализ исходного уровня и динамики расходования прочностных характеристик сплава ЖС6У-ВИ, применяемого для изготовления турбинных лопаток двигателей семейства НК, работающих в составе газоперекачивающих агрегатов. Исследование выполнено на основе анализа большого объема данных металлургического контроля производства и эксплуатации по механическим свойствам и микроструктуре материала.

Ключевые слова: сплав ЖС6У-ВИ, механические свойства, статистический анализ, лопатка, турбина, газоперекачивающий агрегат.

Operational patterns of strength characteristics spending of the turbine blades of GPU engines material

Protasova N.A.¹, Velikanova N.P.¹, Velikanov P.G.¹, Akhmadeyev A.A.²

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan

² Open Joint Stock Company «КМПО», Kazan

This paper analyses initial level and dynamics of strength characteristics spending of ZhS6U-VI alloy (turbine rotor blade material) depending on the duration of operation of the NK engines family, working as part of gas pumping units. Large amount of metallurgical control of production and operation data on the mechanical properties and microstructure of the material has been used for this analysis.

Keywords: ZhS6U-VI alloy, mechanical properties, statistical analysis, blade, turbine, gas pumping unit.

Введение

Для газотурбинных двигателей, в том числе двигателей газоперекачивающих агрегатов (ГПА), основными факторами, определяющими ресурс рабочих лопаток турбины, являются, с одной стороны, обеспечение исходного уровня прочностных характеристик материала лопаток серийного производства, с другой стороны, установление динамики расходования этих характеристик при эксплуатации. Уровень и рассеяние механических свойств материала влияют на величину ресурса и показатели надежности самой детали и конструкции в целом [1 – 3].

Учитывая вероятностную природу механических свойств материалов, обусловленную влиянием неустрашимых флуктуаций большого числа факторов (техно-

логических, макро- и микроструктурных, связанных с изменчивостью условий испытаний и т.п.), проведено статистическое исследование результатов металлургического контроля механических свойств рабочих лопаток турбины из сплава ЖС6У-ВИ серийных двигателей ГПА семейства НК (НК-16СТ, НК-16-18СТ) за длительный период их производства и эксплуатации. На основе методов регрессионного анализа выполнено прогнозирование динамики эксплуатационного расходования механических свойств материала турбинных лопаток за ресурс 150 и 200 тыс. ч.

Влияние эксплуатационной наработки на механические свойства материала лопаток определено путем сопоставления исходных значений механических свойств материала по результатам приемочного контроля и результатов испытания образцов, вырезанных из лопаток

турбин после эксплуатации (результаты испытаний предоставлены ЦЗЛ ОАО «КМПО»). Уровень стабильности технологии лопаточного производства оценен по величине дисперсии средних значений σ_a^2 характеристик механических свойств, являющейся внутренней объективной оценкой качества материала и элементов конструкций, а также количественной характеристикой стабильности производства по механическим свойствам [3, 4].

Статистическая обработка результатов испытаний выполнена с использованием программ MS Excel и «Статистика+». Исследование микроструктуры проведено при увеличениях до 10 000 раз в растровом электронном микроскопе JSM-6460LV (исследования выполнены в лаборатории металлофизики ОАО «КМПО»).

Сплав ЖС6У-ВИ относится к группе жаропрочных никелевых сплавов с поликристаллической равноосной структурой и представляет собой γ -твердый раствор, упрочненный частицами γ' -фазы. Границы зерен имеют карбидное упрочнение. Отливка заготовок лопаток и образцов (отливаются вместе с лопатками) для испытания механических свойств производится способом равноосной кристаллизации в печах УППФ. Термическая обработка, которой подвергаются лопатки и образцы, направлена на формирование в сплаве преимущественно кубовидных выделений основной упрочняющей γ' -фазы оптимальных размеров. Для серийного производства лопаток характерно наличие в структуре определенной ликвационной неоднородности, формирующей разнодисперсные выделения γ' -фазы в эпицентре и на периферии дендрита, что может влиять на величину рассеяния механических свойств.

Исследование исходного уровня механических свойств и колебаний качества в процессе производства

Для анализа исходных механических свойств материала использованы данные, полученные при серийном контроле рабочих лопаток первой ступени турбины за период производства 1986...2008 гг. Суммарный объем выборки, подвергнутых статистической обработке, составил: 361 образец по кратковременным механическим испытаниям (при температуре 20°C) и 2842 образца по испытаниям долговечности (при 975°C, 230 МПа).

Исследование исходных свойств проведено по отдельным партиям, сгруппированным по годам производства, и в целом за весь период производства («марочные» характеристики [5]) с целью оценки стабильности серийного производства и установления влияния технологических факторов на уровень механических свойств сплава ЖС6У-ВИ.

По результатам проверки гипотезы о нормальности функций распределения механических свойств при помощи критерия согласия Шапиро – Уилка и приближенных критериев, использующих выборочные показатели асимметрии и эксцесса, установлено, что для исследованного периода производства кратковременные характеристики предела прочности σ_b , характеристики относительного удлинения δ и сужения ψ для сплава ЖС6У-ВИ не противоречат нормальной функции распределения при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Проверка гипотезы о нормальности функции распределения характеристик долговечности τ и $\lg \tau$ показала, что лучшее соответствие нормальному закону имеет характеристика $\lg \tau$, что согласуется с выводами многих авторов [3 – 5], исследовавших эту прочностную характеристику применительно к лопаточным и дисковым сплавам.

В связи с тем, что выборочные числовые характеристики механических свойств обладают определенным рассеянием, проведена оценка значимости в расхождении выборочных характеристик по годам (партиям) производства путем проверки однородности ряда дисперсий по критерию Бартлетта. На основании полученных результатов проведена группировка партий в периоды, в пределах которых гипотеза об однородности дисперсий не отвергается. Затем для этих периодов на основе однофакторного дисперсионного анализа выполнена проверка однородности средних по критерию Фишера.

Результаты проверки статистических гипотез эмпирических распределений кратковременных механических свойств при температуре 20°C и долговечности при температуре 975°C (230 МПа) сплава ЖС6У-ВИ при производстве лопаток турбины приведены в табл. 1. Видно, что в пределах установленных периодов производства дисперсии однородны, при этом нулевая гипотеза H_0 о равенстве (однородности) средних отвергается.

Таким образом, характеристики эмпирических распределений механических свойств исходного материала лопаток, определяющие рассеяние, не зависят от колебаний плавочных, структурных и технологических факторов производства. При этом средние значения не одинаковы и зависят от вариации этих факторов в пределах установленных периодов производства.

На рис. 1 приведены итоговые диаграммы выборочных средних для исследуемого периода производства, характеризующие исходный уровень кратковременных и длительных механических свойств сплава ЖС6У-ВИ лопаток турбины ГПА изделий НК. Исходный уровень превышает нормативные требования по всем исследованным характеристикам. Исключение составляют лопатки, произведенные в 1995 г., для которых нижняя граница доверительного интервала

Таблица 1. Результаты проверки статистических гипотез эмпирических распределений кратковременных и длительных механических свойств сплава ЖС6У-ВИ при производстве лопаток турбины двигателей ГПА

Характеристика	Период производства	Количество партий в группе	Суммарный объем выборки	Проверка однородности ряда дисперсий по критерию Барглета			Проверка однородности ряда средних по F-критерию		
				χ^2	$\chi_{\alpha}^2, \alpha = 0,05$	H_0	S_1^2 / S_2^2	$F_{0,95}$	H_0
σ_B	A	6	214	1,16	11,10	+	9,19	2,26	-
	B	5	147	5,43	9,49	+	5,70	2,43	-
δ	A	11	359	9,09	18,30	+	3,05	1,85	-
ψ	A	6	206	7,39	11,10	+	2,80	2,26	-
	B	5	154	5,61	9,49	+	7,35	2,43	-
lg τ	A	8	1593	11,5	14,1	+	10,91	2,03	-
	B	3	229	0,33	5,99	+	3,54	3,04	-
	C	7	1020	7,05	12,6	+	21,33	2,12	-

характеристики долговечности расположилась ниже нормы (0,96 от нормы) при выборочном среднем, равном 1,07 от нормы.

На основании равенства дисперсий выполнена оценка генеральной дисперсии σ^2 значений характеристик механических свойств, доверительных интервалов ($\sigma^2 - \Delta\sigma^2, \sigma^2 + \Delta\sigma^2$), оценка степени вариации генеральных средних σ_a^2 (дисперсия средних) и среднего квадратичного отклонения σ_a , что позволило выявить и количественно оценить уровни стабильности лопаточного производства (табл. 2).

Из приведенных данных следует, что исследованный многолетний диапазон лопаточного производства характеризуется периодами с разными уровнями стабильности по механическим свойствам σ_B, ψ и lg τ . По характеристике относительного удлинения δ исследованный диапазон производства характеризуется 11-ю нормально распределенными генеральными

Таблица 2. Оценка стабильности производства лопаток турбины из сплава ЖС6У-ВИ по механическим свойствам

Характеристика	Период производства	Оценка генеральной дисперсии σ^2			Оценка дисперсии средних	
		σ^2	$\sigma^2 - \Delta\sigma^2$	$\sigma^2 + \Delta\sigma^2$	σ_a^2	σ_a
σ_B	A	825,77	687,48	1010,66	136,09	11,67
	B	1247,34	1001,34	1597,16	283,30	16,83
δ	A	1,64	1,42	1,91	0,12	0,35
ψ	A	1,95	1,62	2,40	0,17	0,41
	B	4,51	3,64	5,74	1,10	1,05
lg τ	A	0,0082	0,0076	0,0088	0,0019	0,0432
	B	0,0107	0,0090	0,0130	0,0032	0,0565
	C	0,0048	0,0044	0,0052	0,0069	0,0833

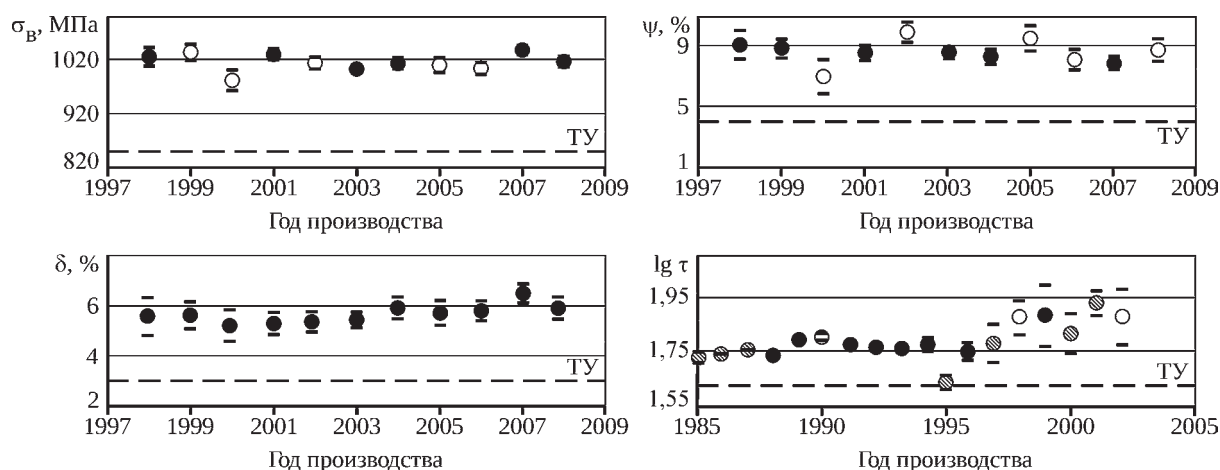


Рис. 1. Диаграммы выборочных средних значений механических свойств σ_B, δ, ψ (при 20°C) и долговечности lg τ (при 975°C; 230 МПа) по годам производства лопаток турбины первой ступени из сплава ЖС6У-ВИ. Указаны 95%-ные доверительные интервалы:

● – период А; ○ – период В; ◐ – период С

Таблица 3. «Марочные» характеристики механических свойств сплава ЖС6У-ВИ турбинных лопаток

Период производства	1998...2008 гг.			1985...2002 гг.	
	Механические свойства при 20°C			Долговечность при 975°C, 230 МПа	
Статистики	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	$\lg \tau$	τ , ч
Объем выборки m	11			18	
Среднее \bar{a}	1014,74	5,66	8,55	1,78	62,84
Доверительный интервал Δa	10,88	0,25	0,53	0,033	4,94
Дисперсия s^2	262,17	0,13	0,63	0,004	99,66
Стандартное отклонение s	16,19	0,37	0,79	0,067	9,98
Норма по ТУ	≥ 850	≥ 3	≥ 4	–	≥ 42

* Уровень значимости для доверительного интервала 0,05

совокупностями с общей дисперсией $\sigma^2 = 1,64$ и различными средними, на значения которых значимо влияют вариации различных технологических факторов, оцененных величиной $\sigma_a^2 = 0,12$.

«Марочные» характеристики кратковременных механических свойств и долговечности сплава ЖС6У-ВИ при серийном производстве рабочих лопаток определены путем усреднения выборочных средних по годам производства за весь исследованный период и приведены в табл. 3. «Марочные» значения превосходят нормативные требования по пределу прочности, относительному удлинению и относительному сужению в 1,2, 1,9 и 2,1 раза соответственно, по долговечности в 1,5 раза.

Исследование влияния эксплуатационной наработки на уровень механических свойств материала

Для определения влияния длительности эксплуатации на распределение механических свойств использованы данные металлургического контроля при проведении ремонта и при исследовании по планам ресурсных работ. Статистический анализ проведен по выборкам, сгруппированным по диапазонам наработки: до 30, 50, 70 и 100 тыс. ч. Суммарный объем выборки составил 151 образец по кратковременным механическим испытаниям (при 20°C) и 245 образцов по испытаниям долговечности (975°C, 230 МПа). Испытания проведены на образцах, вырезанных из горячей и холодной зон лопатки: из горячей зоны пера вырезаны нестандартные образцы-пробы диаметром 3 мм с неоформленным захватом (головкой) диаметром 5 мм в зоне наибольшей толщины профиля пера; из холодной зоны (с заходом в замок) вырезаны образцы диаметром 5 мм.

Для проверки гипотезы о нормальности распределения характеристик механических свойств после эксплуатации использован графический способ, а также критерий согласия Шапиро – Уилка и приближенные

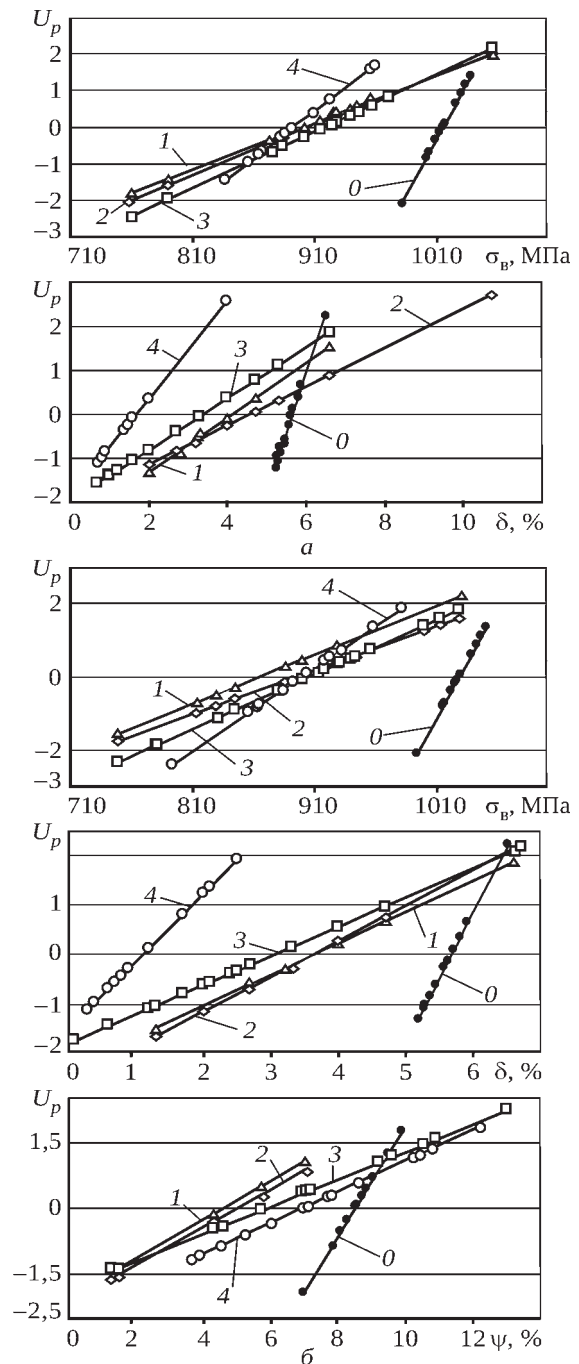


Рис. 2. Графики эмпирических распределений значений кратковременных механических свойств σ_B , δ , ψ (при 20°C) сплава ЖС6У-ВИ лопаток первой ступени турбины двигателей ГПА в исходном состоянии и после эксплуатационной наработки: а – образцы из холодной зоны; б – образцы из горячей зоны; 0 – исходное состояние; 1 – наработка до 30 тыс. ч; 2 – наработка до 50 тыс. ч; 3 – наработка до 70 тыс. ч; 4 – наработка до 100 тыс. ч

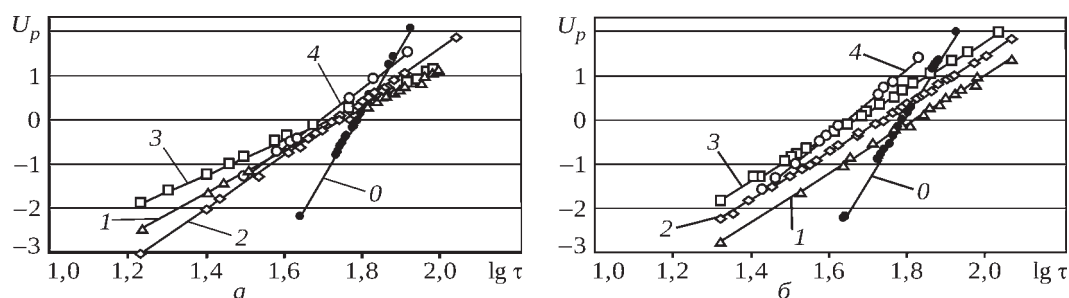


Рис. 3. Графики эмпирических распределений десятичного логарифма долговечности (при 975°C, 230 МПа) сплава ЖС6У-ВИ лопаток первой ступени турбины двигателей ГПА в исходном состоянии и после эксплуатационной наработки: а – образец из холодной зоны; б – образец из горячей зоны; 0 – исходное состояние; 1 – наработка до 30 тыс. ч; 2 – наработка до 50 тыс. ч; 3 – наработка до 70 тыс. ч; 4 – наработка до 100 тыс. ч

критерии, использующие выборочные показатели асимметрии и эксцесса. Эмпирические распределения кратковременных свойств и долговечности (рис. 2 и рис. 3) удовлетворительно аппроксимируются прямой линией на вероятностной сетке нормального распределения. Это свидетельствует о том, что экспериментальные данные не противоречат нормальному закону распределения как в исходном состоянии, так и после длительной наработки в эксплуатации. Соответствие нормальному закону распределения подтверждено также аналитическими критериями (табл. 4 – табл. 6).

Проверкой однородности дисперсий по критерию Бартлетта установлено, что гипотеза об однородности дисперсий исследуемых характеристик как в холодной, так и в горячей зонах лопатки не отвергается (табл. 7).

Методом однофакторного дисперсионного анализа показано, что для характеристик долговечности в холодной зоне и характеристик кратковременной прочности и относительного сужения в холодной и горячей зонах гипотеза об однородности средних не отвергается. Напротив, характеристики долговечности в горячей зоне, относительного удлинения в холодной и горячей зонах при различных уровнях эксплуатационной наработки характеризуются совокупностью нормально распределенных величин с общей дисперсией и разными средними значениями.

Таким образом, длительная эксплуатационная наработка материала рабочих лопаток турбин ГПА не оказывает влияния на закон распределения характеристик механических свойств и величины дисперсии, но влияет

Таблица 4. Результаты проверки гипотезы о нормальности распределения характеристик механических свойств σ_B и δ (холодная зона лопатки) сплава ЖС6У-ВИ после эксплуатации

Наработка, тыс. ч	\bar{a}	s	s^2	Объем выборки	Статистики	Критерий согласия			
						Шапиро-Уилка	Д'Агостино		
							Асимметрия	Эксцесс	Общее
σ_B , МПа									
30	900,7	78,6	6182	11	Значение статистики	0,93	0,12	1,05	1,11
					Уровень значимости $H_0: 5\%$	0,38	0,91	0,30	0,57
50	907,2	73,5	5405	14	Значение статистики	0,95	0,49	1,03	1,30
					Уровень значимости $H_0: 5\%$	0,63	0,62	0,30	0,52
70	917,7	64,6	4169	19	Значение статистики	0,91	1,41	1,75	5,02
					Уровень значимости $H_0: 5\%$	0,07	0,16	0,08	0,08
100	894,1	39,6	1570	11	Значение статистики	0,94	0,81	-0,32	0,76
					Уровень значимости $H_0: 5\%$	0,57	0,42	0,75	0,68
δ , %									
30	4,12	1,61	2,59	9	Значение статистики	0,91	0,93	-0,24	0,91
					Уровень значимости $H_0: 5\%$	0,31	0,35	0,81	0,63
50	4,59	2,26	5,12	14	Значение статистики	0,86	2,52	2,09	10,72
					Уровень значимости $H_0: 5\%$	0,03	0,01	0,04	0,00
70	3,39	1,70	2,90	19	Значение статистики	0,95	0,60	-0,14	0,38
					Уровень значимости $H_0: 5\%$	0,44	0,55	0,89	0,83
100	1,68	0,90	0,82	11	Значение статистики	0,82	2,50	2,36	11,84
					Уровень значимости $H_0: 5\%$	0,02	0,01	0,02	0,00

на средние значения характеристик долговечности в горячей зоне и кратковременных характеристик относительного удлинения в горячей и холодной зонах лопатки. Характеристики кратковременных механических свойств σ_B и ψ , а также долговечности в холодной зоне лопатки от эксплуатационной наработки не зависят.

Итоговые зависимости средних значений долговечности в горячей зоне и относительного удлинения в горячей и холодной зонах лопатки от эксплуатационной наработки приведены на рис. 4 и рис. 5.

Для характеристики относительного удлинения после наработки 70...100 тыс. ч получено снижение средних значений до 1,7% для холодной зоны лопатки и 1,1% для горячей зоны, при норме на новые лопатки не менее 3%. Средние значения долговечности материала лопаток в горячей зоне при наработке остаются на уровне, соответствующем нормативным требованиям.

Для установления количественных связей между характеристиками механических свойств и наработкой использован метод регрессионного анализа. Наилучшая аппроксимация изменения характеристик долговечности (при 975°C, 230 МПа) материала лопаток по мере увеличения наработки достигнута степенным уравнением, характеристик относительного удлинения (при 20°C) – экспоненциальным уравнением. Аппроксимирующие уравнения приведены в табл. 8.

Продолжение регрессионных зависимостей до наработок 200 тыс. ч позволило оценить динамику эксплуатационного расходования механических свойств материала турбинных лопаток за ресурс 150 и 200 тыс. ч (рис. 6). По достижении наработки 150 тыс. ч прогнозируется дальнейшее снижение относительного удлинения: среднее значение в горячей зоне составит около 0,6%, в холодной зоне – 1%.

Таблица 5. Результаты проверки гипотезы о нормальности распределения характеристик механических свойств σ_B , δ и ψ (горячая зона лопатки) сплава ЖС6У-ВИ после эксплуатации

Наработка, тыс. ч	\bar{a}	s	s^2	Объем выборки	Статистики	Критерий согласия			
						Шапиро- Уилка	Д'Агостино		
							Асиммет- рия	Экссесс	Общее
σ_B , МПа									
30	849,5	74,7	5581	11	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,93 0,45 +	1,36 0,17 +	1,19 0,23 +	3,26 0,20 +
50	879,2	83,0	6882	15	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,96 0,63 +	0,26 0,80 +	-0,79 0,43 +	0,69 0,71 +
70	890,5	66,8	4465	28	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,96 0,37 +	1,08 0,28 +	0,10 0,92 +	1,17 0,56 +
100	884,9	43,8	1919	16	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,96 0,70 +	0,74 0,46 +	1,32 0,19 +	2,28 0,32 +
δ , %									
30	3,63	1,55	2,41	8	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,94 0,62 +	0,96 0,34 +	1,11 0,27 +	2,16 0,34 +
50	3,60	1,37	1,89	15	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,96 0,65 +	0,61 0,54 +	0,42 0,67 +	0,54 0,76 +
70	3,03	1,66	2,76	28	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,96 0,37 +	1,08 0,28 +	0,10 0,92 +	1,17 0,56 +
100	1,10	1,23	2,51	16	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,86 0,02 -	1,39 0,16 +	-0,92 0,36 +	2,79 0,25 +
ψ , %									
30	4,76	2,27	5,17	8	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,83 0,05 +	1,19 0,23 +	-0,40 0,69 +	1,58 0,45 +
50	5,19	2,33	5,42	13	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,74 0,00 -	1,69 0,09 +	-0,41 0,68 +	3,01 0,22 +
70	6,17	3,23	10,44	24	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,92 0,07 +	0,05 0,96 +	-0,25 0,80 +	0,07 0,97 +
100	7,14	2,82	7,97	16	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,95 0,46 +	0,55 0,58 +	-1,04 0,30 +	1,38 0,50 +

Таблица 6. Результаты проверки гипотезы о нормальности распределения характеристики долговечности $\lg \tau$ сплава ЖС6У-ВИ после эксплуатации

Наработка, тыс. ч	\bar{a}	s	s^2	Объем выборки	Статистики	Критерий согласия			
						Шапиро-Уилка	Д'Агостино		
							Асимметрия	Экссесс	Общее
Холодная зона лопатки									
30	1,75	0,21	0,044	20	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,89 0,03 -	2,08 0,04 -	0,68 0,49 +	4,79 0,09 +
50	1,73	0,16	0,027	31	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,91 0,71 +	2,61 0,01 -	1,98 0,05 -	10,71 0,00 -
70	1,71	0,25	0,062	19	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,89 0,03 -	1,05 0,29 +	-1,37 0,17 +	2,99 0,22 +
100	1,69	0,15	0,022	7	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,95 0,74 +	- - -	-0,69 0,49 +	- - -
Горячая зона лопатки									
30	1,81	0,18	0,031	19	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,91 0,08 +	2,26 0,02 -	1,59 0,11 +	7,65 0,02 -
50	1,72	0,18	0,033	40	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,97 0,39 +	1,22 0,22 +	-0,38 0,70 +	1,63 0,44 +
70	1,65	0,19	0,035	22	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,98 0,94 +	0,61 0,54 +	-0,53 0,60 +	0,65 0,72 +
100	1,64	0,13	0,017	11	Значение статистики Уровень значимости H_0 : 5%	0,94 0,53 +	0,32 0,75 +	-1,18 0,24 +	1,50 0,47 +

Таблица 7. Результаты проверки статистических гипотез эмпирических распределений кратковременных и длительных механических свойств сплава ЖС6У-ВИ лопаток турбины после эксплуатации в составе двигателей ГПА

Характеристика	Наработка, тыс. ч	Объем выборки	Проверка однородности ряда дисперсий по критерию Бартлета			Проверка однородности ряда средних по F-критерию		
			χ^2	$\chi_{\alpha}^2, \alpha=0,05$	H_0	S_1^2/S_2^2	$F_{0,95}$	H_0
Холодная зона лопатки								
σ_B	30	11	4,68	7,82	+	0,34	2,79	+
	50	14						
	70	19						
	100	11						
δ	30	9	7,78	7,82	+	6,29	2,80	-
	50	14						
	70	19						
	100	11						
$\lg \tau$	30	20	5,07	7,82	+	0,18	2,74	+
	50	31						
	70	19						
	100	7						
Горячая зона лопатки								
σ_B	30	11	5,72	7,82	+	1,00	2,75	+
	50	15						
	70	28						
	100	16						
δ	30	8	0,62	7,82	+	8,46	2,75	-
	50	15						
	70	28						
	100	16						
ψ	30	8	2,19	7,82	+	1,74	2,78	+
	50	13						
	70	24						
	100	16						
$\lg \tau$	30	19	1,56	7,82	+	3,23	2,72	-
	50	40						
	70	22						
	100	11						

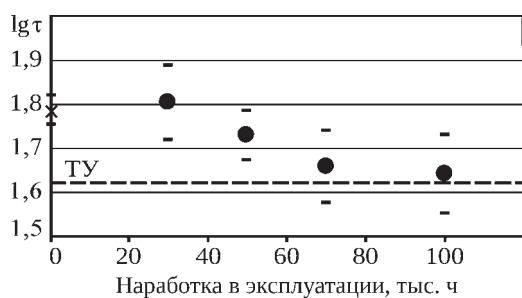


Рис. 4. Изменение средних значений долговечности $\lg \tau$ сплава ЖС6У-ВИ в горячей зоне лопатки при различной наработке (указаны 95%-ные доверительные интервалы): \times – исходное значение

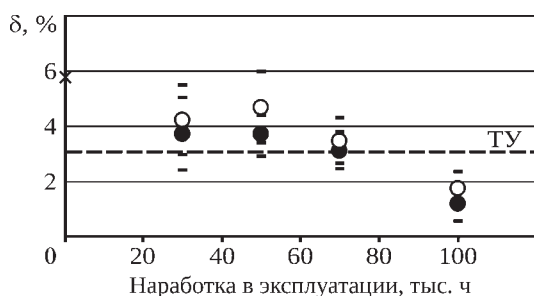


Рис. 5. Изменение средних значений относительного удлинения δ сплава ЖС6У-ВИ при различной наработке (указаны 95%-ные доверительные интервалы): \times – исходное значение; \bullet – горячая зона; \circ – холодная зона

Таблица 8. Аппроксимация зависимостей механических свойств от наработки

Характеристика	Уравнение аппроксимации	Достоверность аппроксимации R^2
Кратковременное растяжение при 20°C		
Относительное удлинение δ в холодной зоне, %	$7,5514 e^{-0,0136x}$	0,8116
Относительное удлинение δ в горячей зоне, %	$7,5194 e^{-0,0172x}$	0,8068
Длительное растяжение при 975°C, 230 МПа		
Долговечность $\bar{\tau}$ в горячей зоне, ч	$225,44 x^{-0,3525}$	0,9936

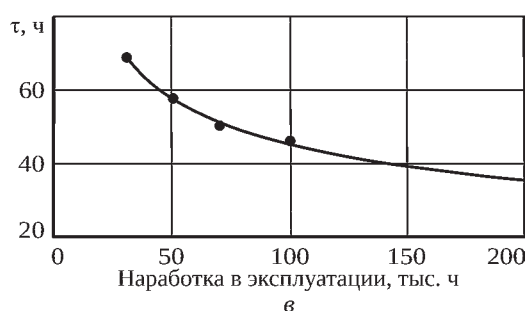
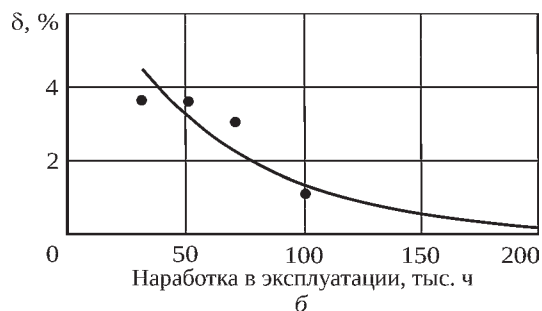
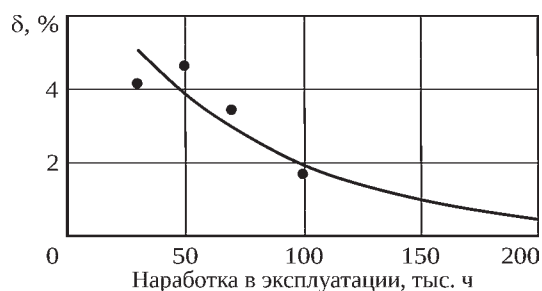


Рис. 6. Изменение средних значений характеристик относительного удлинения в холодной (а) и горячей (б) зонах лопатки и долговечности в горячей зоне (в) от наработки

По долговечности при наработке 150 тыс. ч ожидается незначительное снижение до значений 38...39 ч при норме на новый материал не менее 42 ч.

По достижении наработки 200 тыс. ч прогнозируется снижение средних значений относительного удлинения до 0,3%, долговечности до 34...35 ч.

На рис. 7 и рис. 8 приведены типичные фотографии морфологии основных фазовых составляющих материала ЖС6У-ВИ в исходном состоянии и после эксплуатационной наработки 70...100 тыс. ч.

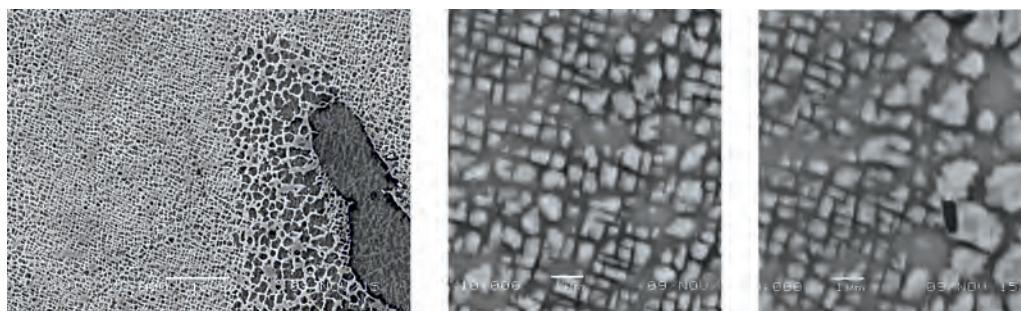


Рис. 7. Типичная микроструктура сплава ЖС6У-ВИ рабочей лопатки турбины ГПА в исходном состоянии после термической обработки

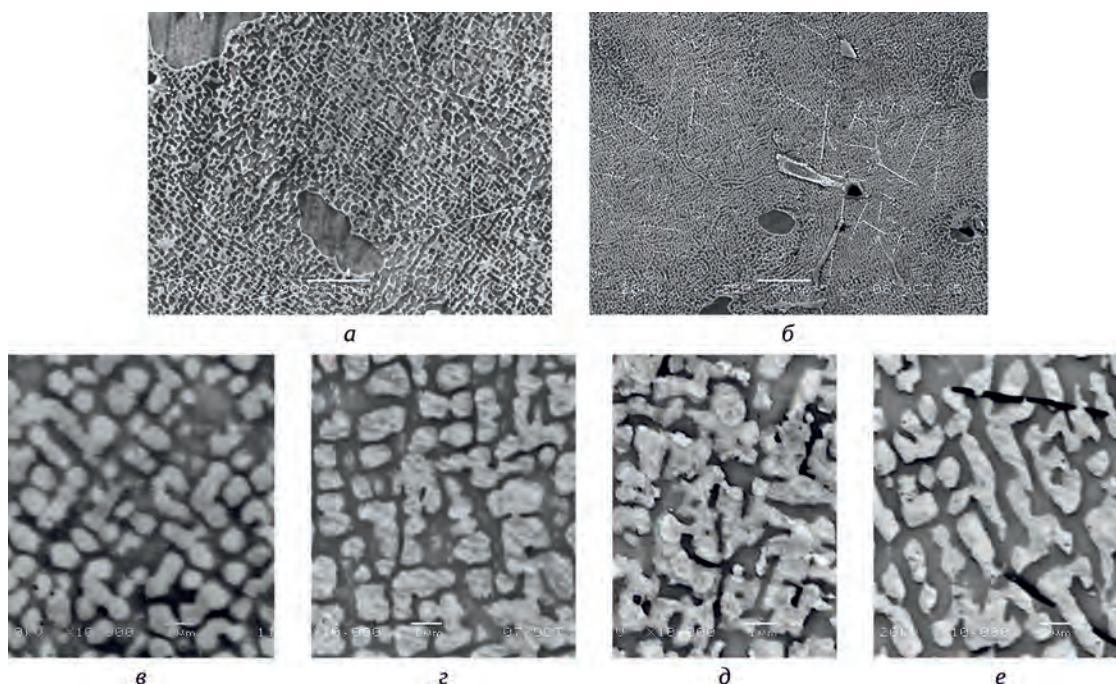


Рис. 8. Типичная микроструктура сплава ЖС6У-ВИ рабочей лопатки турбины ГПА после эксплуатационной наработки 70...100 тыс. ч

Сопоставлением микроструктуры материала в исходном состоянии и после наработки 70...100 тыс. ч установлено следующее:

- после длительной эксплуатации микроструктура основной упрочняющей γ' -фазы претерпевает незначительные изменения, наблюдается начальный процесс направленной коалесценции частиц (рис. 8, в–е), что сопровождается сохранением высокого уровня жаропрочности, не ниже нормативных требований на исходный материал;

- выявлены игольчато-пластинчатые выделения ТПУ-фаз (рис. 8, а, б, е), как в холодной, так и в горячей зонах лопатки, вызывающие, как известно, охрупчивание сплава [6, 7]: в нашем случае получено значительное снижение уровня относительного удлинения (ниже норматива на исходный материал).

Закключение

По результатам анализа большого объема данных металлургического контроля производства и эксплуатации по механическим свойствам (кратковременное растяжение при 20°C, длительное растяжение при 975°C, 230 МПа) и микроструктуре материала рабочих лопаток первой ступени турбины из сплава ЖС6У-ВИ за период производства 1986...2008 гг. и после длительной эксплуатации до 100 тыс. ч в составе двигателей семейства НК газоперекачивающих агрегатов получено следующее.

1. Характеристики кратковременных свойств σ_B , δ , ψ материала распределены по нормальному закону,

характеристики долговечности τ – по логарифмически нормальному закону, как в исходном состоянии, так и после длительной эксплуатационной наработки до 100 тыс. ч. Длительная наработка не оказывает влияния на величины дисперсии распределений, но влияет на средние значения характеристик долговечности в горячей зоне лопатки и кратковременных характеристик относительного удлинения (пластичности) материала в горячей и холодной зонах лопатки. Характеристики кратковременных механических свойств σ_B и ψ от наработки не зависят.

2. В процессе длительной эксплуатации 70...100 тыс. ч происходит снижение характеристик относительного удлинения δ до 1,1...1,7% при норме не менее 3%; уровень долговечности τ снижается, но остается выше нормативного значения.

3. Снижение характеристик относительного удлинения δ как в холодной, так и в горячей зонах лопатки после длительной эксплуатационной наработки вызвано выделением в структуре материала игольчато-пластинчатых ТПУ-фаз, охрупчивающих сплав; сохранение жаропрочности сплава на уровне не ниже нормативного объясняется сохранением морфологии основной упрочняющей γ' -фазы близкой к исходной.

4. Установлены количественные связи между характеристиками механических свойств (τ и δ) и наработкой, на основании которых определена динамика эксплуатационного расходования механических свойств. Наилучшая аппроксимация эксплуатационных изменений характеристик долговечности τ (при 975°C, 230 МПа) материала лопаток достигнута степенным

уравнением, характеристик относительного удлинения δ (при 20°C) – экспоненциальным уравнением.

5. Установлены периоды производства лопаток с разными уровнями стабильности, которые оценены по величине дисперсии средних значений σ_a^2 характеристик механических свойств.

6. «Марочные» характеристики механических свойств сплава ЖС6У-ВИ, используемого для литья

рабочих лопаток турбины, превышают нормативные требования по пределу прочности в 1,2 раза, относительному удлинению – в 1,9 раз, относительному сужению – в 2,1 раза, долговечности – в 1,5 раза.

7. Полученные результаты могут использоваться в работах по обоснованию и продлению назначенного ресурса двигателей семейства НК ГПА, а также решении задач по оценке стабильности лопаточного производства.

Литература

1. Биргер И.А. Прочность и надежность машиностроительных конструкций (Избранные труды). Раздел 8. Надежность и ресурс авиационных двигателей. Уфа: УГАТУ, 1998. С. 256–274.
2. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990. 448 с.
3. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 2005. 400 с.
4. Демьянушко И.В., Великанова Н.П., Корноухов А.А. Прогнозирование долговечности роторных деталей в условиях реального нагружения // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков, 2001. Вып. 23. С. 119–120.
5. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 464 с.
6. Lvov E., Norsworthy D. Influence of Previous Operational Cycle on the Microstructure of Rejuvenated Ni-base Superalloy Gas Turbine Blades After Their Return to Service // Proceedings of the 29th Turbomachinery Symposium, Houston, Texas. P. 113–124.
7. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под редакцией Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля // Пер. с англ. В 2-х книгах. Кн. 1 / Под ред. Р.Е. Шалина. М.: Металлургия, 1995. 384 с.

References

1. Birger I.A. Prochnost' i nadezhnost' mashinostroitel'nykh konstruktssii [Strength and Reliability of Engineering Constructions]. Part 8. Nadezhnost' i resurs aviatsionnykh dvigatelei [Reliability and Resource of Aircraft Engines]. Ufa: UGATU, 1998. P. 256–274.
2. Bolotin V.V. Resurs mashin i konstruktssii [Life of Machines and Constructions]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 448 p.
3. Stepnov M.N., Shavrin A.V. Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy [Statistical Technology of Mechanical Test Data Processing]. Moscow: Mashinostroenie, 2005. 400 p.
4. Dem'ianushko I.V., Velikanova N.P., Kornoukhov A.A. Prognozirovanie dolgovechnosti rotornykh detalei v usloviakh real'nogo nagruzheniya. Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya [Life Prediction of Rotor Part in Real Loading]. Khar'kov, 2001. Issue 23. P. 119–120.
5. Kablov E.N., Golubovskii E.R. Zharoprochnost' nikelovykh splavov [Heat Resistance of Nickel Alloy]. Moscow: Mashinostroenie, 1998. 464 p.
6. Lvov E., Norsworthy D. Influence of Previous Operational Cycle on the Microstructure of Rejuvenated Ni-base Superalloy Gas Turbine Blades After Their Return to Service // Proceedings of the 29th Turbomachinery Symposium, Houston, Texas. P. 113–124.
7. Supersplavy II: Zharoprochnye materialy dlia aerokosmicheskikh i promyshlennykh energoustanovok [Superalloys II: Heat-resistant Materials for Aerospace and Industrial Power Plants] edited by Ch.T. Simsa, N.S. Stoloffa, U.K. Khagelia. Translation from English in two books, edited by R.E. Shalin. Moscow: Metallurgiya, 1995. 384 p.