

А. М. СУЛИМА

УСТАЛОСТЬ ТЕПЛОСТОЙКИХ И ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ И РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В современных реактивных двигателях наиболее нагруженными деталями, определяющими ресурс и надежность их работы, являются рабочие лопатки газовой турбины и компрессора. Эти детали, изготавливаемые из жаропрочных и теплостойких материалов, работают в условиях высоких температур и, как правило, больших вибрационных нагрузок.

Опыт эксплуатации реактивных двигателей показывает, что преждевременное разрушение лопаток преимущественно носит усталостный характер. Причем, случаи поломки лопаток РД происходят при высокочастотном вибрационном нагружении на частотах, превышающих 1000 *гц*.

Влияние же высокой частоты нагружения и конструктивной формы деталей на выносливость теплостойких и жаропрочных сплавов при рабочих температурах исследовано весьма слабо.

Для повышения усталостной прочности в машиностроении применяется целый ряд технологических методов. Однако эффективность этих методов к деталям, работающим в условиях высокой температуры и высокочастотного нагружения еще не установлена.

Московским авиационным институтом совместно с другими организациями проведены исследования ряда жаропрочных, теплостойких, титановых и алюминиевых сплавов. Задачей исследования являлось установление влияния частоты нагружения, геометрической формы и методов чистовой и отделочной обработки на сопротивление усталости исследуемых сплавов.

ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ. ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Исследования выполняли на двух высокочастотных стендах с резонансным возбуждением — электродинамическом и магнито-стрикционном. Рабочий диапазон частот электродинамического вибратора составлял 100—3000 *гц*, ускорение до 50 *g*, магнито-стрикционного — 5000 и 10000 *гц*.

Усталость материалов исследовали на консольных образцах при знакопеременном симметричном изгибе с заданной температурой согласно программе испытаний. Испытуемый образец закреплялся в патроне, жестко связанном с колебательной системой вибратора. Для нагрева образцов в процессе испытаний применяли высокотемпературную электропечь, в которой обеспечены автоматическое регулирование заданной температуры и равномерное распределение температурного поля по всей длине испытуемого образца. Температуру измеряли термопарами с помощью потенциометра.

В процессе испытаний каждый образец доводили до разрушения при постоянной амплитуде его колебаний, измеренных катетометром. Уровень задаваемых напряжений определяли расчетным путем по измерению амплитуды колебаний вершины образца. Рабочую частоту испытаний контролировали частотомером. Момент начала разрушения образца устанавливался по падению резонансной частоты его колебаний, а число циклов до разрушения — по времени.

Максимальное напряжение в критическом сечении консольного образца, у которого отношение резонансной длины к диаметру образца $\frac{L}{d} \leq 10$, определялись по следующей формуле:

$$\sigma_{\max} = 1,7578 \psi_0 \cdot \psi \frac{Ed}{L^2} \cdot A, \quad (1)$$

где E — модуль упругости материала образца, *кг/мм²*;

d — диаметр цилиндрической части образца, *мм*;

L — резонансная длина образца, *мм*;

A — амплитуда колебаний вершины образца, *мм*;

ψ_0 — коэффициент, учитывающий податливость галтели и опоры образца, а также смещение опасного сечения от места начала галтели в сторону утолщенной части. Он вычисляется по уравнению:

$$\psi_0 = \left(1 - 1,3764 \frac{X_0}{L}\right) \left(\frac{d}{d_0}\right)^3 \quad (2)$$

Здесь d_0 и X_0 — соответственно диаметр и координата опасного сечения, т. е. сечения, где происходит разрушение образца.

$$X_0 = L - l_0, \quad (3)$$

где l_0 — расстояние от вершины образца до опасного сечения;
 l_0 и d_0 — определяются непосредственно на нескольких разрушенных образцах данной серии;

ψ — коэффициент, комплексно учитывающий влияние инерции поворота, деформаций сдвига и депланации поперечных сечений. Он определяется критерием $\frac{L}{d}$. Для практических расчетов коэффициента ψ можно пользоваться таблицей 1.

Расчетную резонансную длину L образца определяли по формуле

$$L = 0,3740 \sqrt{\frac{d}{f}} \sqrt{\frac{Eg}{\gamma}}, \quad (4)$$

Таблица 1

Значение коэффициента ψ

$\frac{L}{d}$	1	1,5	2	2,5	3	3,5	
ψ	0,7087	0,8371	0,8990	0,9322	0,9515	0,9636	
$\frac{L}{d}$	4	4,5	5	6	7	8	10
ψ	0,9720	0,9777	0,9818	0,9871	0,9906	0,9828	0,9954

где f — заданная частота, $гц$;

$g = 9810$ $мм/сек^2$, ускорение силы тяжести;

γ — удельный вес материала образца, $кг/мм^3$.

Длина цилиндрической части образца l меньше расчетной резонансной длины L . При выбранных конструкции образцов и способах их крепления отношение $\frac{l}{L}$ в основном определяется критерием $\frac{L}{d}$.

Для предварительного выбора длины цилиндрической части образцов по вычисленной длине L пользовались графиком, построенным на основании формулы (4).

Если при виброиспытаниях обнаруживаются расхождения фактической частоты образца с заданной свыше 50 $гц$, возникающие вследствие неточности определения динамического модуля упругости, погрешностей изготовления образцов, недостаточной жесткости закрепления их в патроне, производится подгонка образца по частоте к заданной за счет изменения рабочей длины образца.

Механические свойства

Марка сплава	ТУ	Режимы термообработки	Температура испытаний °С	E	
				5	6
1	2	3	4	5	6
АК4-1		Закалка $535 \pm 5^\circ\text{C}$ + искусственное старение при температуре $150 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 10 часов	20	7200	—
			250	5900	—
ВТ10		Нагрев до 800°C , выдержка 1 час охлаждение на воздухе	20	12830	12910
			500	9680	10620
ЭИ961	ЧМТУ 5949—57	Закалка с 1000°C , охлаждение в масле или на воздухе; отпуск при $550-600^\circ\text{C}$	20	20000	—
			500	14500	—
			550	12500	—
ЭИ617	ЧМТУ 5211—55	Закалка и старение по режиму: 1-я закалка с $1190 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе; 2-я закалка с $1050 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка 4 часа, охлаждение на воздухе; старение при $800 \pm 10^\circ$, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе	20	20000	21200
			800	14500	—
			850	14000	—
ЭИ867	ЧМТУ ЦНИИЧМ 94—58	Закалка и старение по режиму: закалка с $1220 \pm 10^\circ$, выдержка 10 часов, охлаждение на воздухе; старение при $950 \pm 10^\circ$, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе	20	20300	23300
			800	15800	18300
			850	15100	—
			900	14300	16700
ЭП109 (ЭИ867А)	ТУМУ МОС 7099—60	Закалка с $1220 \pm 10^\circ$, выдержка 4—6 часов, охлаждение на воздухе; старение при $950 \pm 10^\circ$, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе	20	—	21165
			900	—	15700
ЭИ929	ЧМТУ ЦНИИЧМ 159—59	1-я закалка с $1220 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе; 2-я закалка с $1050 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе; старение при $850 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе.	20	—	22200
			800	—	17650
			900	—	16650
ЭП57 (ЭИ929)	ЧМТУ ЦНИИЧМ 286—60	1-я закалка с $1200-1220 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка 4 часа, охлаждение на воздухе; 2-я закалка с $1050 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка 1—4 часа, охлаждение на воздухе; старение при $950 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе	20	—	22590
			900	—	17510
ЖС6К	АМТУ 374—56	Нагрев под закалку 1200°C , выдержка 4 часа, охлаждение на воздухе	20	19000	21750
			900	12500-13000	16850
			1000	11900-12200	—
ЖС6-КП		Закалка 1220°C , выдержка 4 часа, охлаждение на воздухе; отжиг при 1050°C , выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе	20	20000	—
			950	12200	—

* Предел выносливости для АК4-1 определяется на базе $2 \cdot 10^7$ циклов.

σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{пу}$	S_k	δ	ψ	a_H кг/мм ²	H_B (d мм)	σ_{100} кг/мм ²	σ_{-1} на базе 10 ⁷ циклов	Удельный вес, г/см ³
кг/мм ²				%						
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
41,5	27,5	19,5	51,5	13	25,5	—	126—131 (71—73)	—	13*	2,8
28	17,5	12	29,5	6	30	—	—	9	—	—
106,2	97,5	80,5	—	5,3	18,0	—	311—340 (34—37)	—	—	4,54
79,0	65,3	49,7	—	8,5	41,4	—	—	—	—	—
125	105	76	200	15	55	8,0	302—332 (3,2—3,35)	—	51	7,8
90	73	40	182	14	60	11,5	—	63	46	—
80	50	30	165	15	60	11,5	—	44	43	—
114,0	75,0	65,5	133,0	14,5	15,0	1,5—3,0	310	—	34—37	8,4
75,0	58,0	46,5	84,5	8,0	12,0	9,6	260	28—30	36—39	—
59,0	47,0	37,5	65,5	10,0	14,0	—	240	18—20	30	—
110—125	75—85	60—70	145	12—25	15—25	3—5	269—364 (3,2—3,7)	—	—	8,57
90—95	65—75	55—60	104	3—8	7—15	5—7	—	43—45	33,5	—
75—85	55—65	40—50	87	3—7	7—12	5—7	—	—	—	—
60—70	40—50	25—35	64	8—18	12—22	5—7	—	19—21	32	—
110—130	—	—	—	9—15	11—16	2—5	3,2—3,4	—	—	8,45
70—80	—	—	—	3—6	5—8	4—6	—	24—26	38	—
100—120	75—80	67—70	110— —120	6—12	8—12	—	350—340 (3,3—3,5)	—	—	8,4
80—90	60—70	55—60	100	9—12	10—15	—	—	40—45	36	—
60—70	40—50	35—40	70—75	12—20	15—25	—	200—220	21—28	30	—
100—120	—	—	—	10—15	12—16	—	320—360	—	—	8,38
60—70	—	—	—	12—17	17—25	—	—	24—26	—	—
90—100	83—85	69—72	99—112	1,15	6,5	1,3—3,0	329—363 (36—39)	—	27	8,1
75—80	51—52	37	77—84	2,0	3,0	—	—	32	29	—
50—57	30—32	18—19	55—59	4,5	6,5	—	—	15—16	—	—
125—140	80—85	65—70	—	10—20	14—25	4,5—7,0	—	—	42	8,25
55—70	33—40	23—25	—	4—11	8—15	—	—	18—25	30	—

За характеристику усталости при высокочастотном нагружении в рабочих температурах принимается сопротивление усталости с указанием числа циклов или времени, при котором произошло разрушение, называемое базой испытаний. Сопротивление усталости — напряжение в момент разрушения образца.

Образцы для исследований изготовлены из материалов, механические свойства которых приведены в таблице 2.

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ НАГРУЖЕНИЯ

Влияние частоты нагружения на сопротивление усталости теплостойких и жаропрочных сплавов (табл. 3) исследовано на консольных образцах круглого сечения.

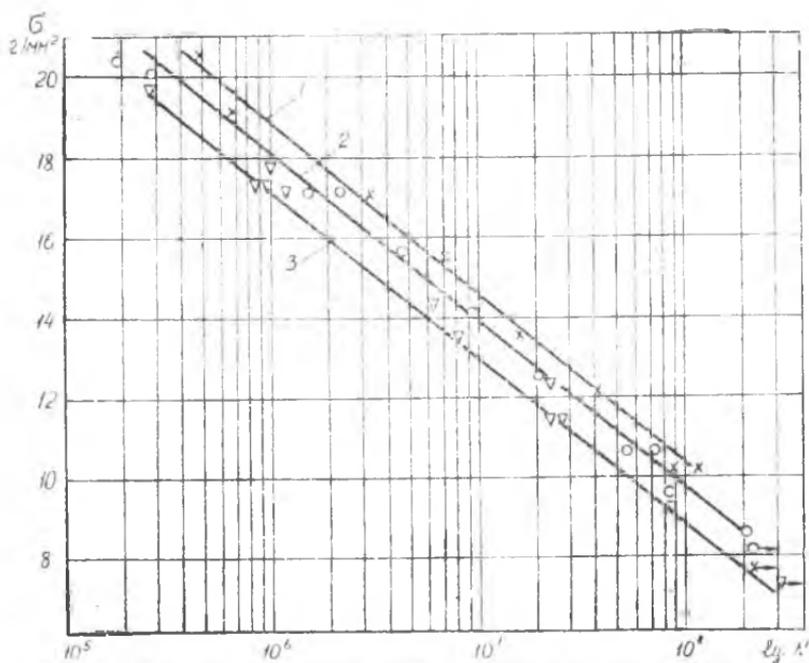
Таблица 3

№ п. п.	Исследуемый материал	Условия испытания	
		частота нагружения, гц	температура, °С
1	Алюминиевый сплав АК4-1	1000—3000	250
2	Титановый сплав BT10	1000—3000	500
3	Теплостойкая сталь ЭИ961	800—2100	500—550
4	Деформируемые жаропрочные сплавы:		
	ЭИ867	1000—10000	900
	ЭП109	500—5000	900
	ЭИ929	500—2200	900
5	Литой жаропрочный сплав ЖС6К обычной и вакуумной плавок	900—10000	900

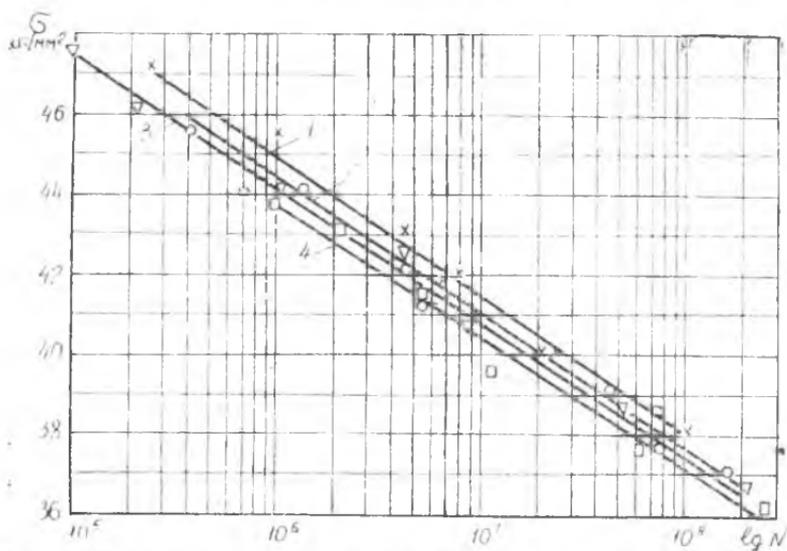
Кривые усталости исследованных, материалов при различных частотах нагружения приведены на фиг. 1—7, а влияние частоты нагружения на сопротивление усталости — на фиг. 8.

Анализ результатов испытания на усталость семи сплавов при рабочих температурах в диапазоне частот нагружения от 500 до 10000 гц показал, что сопротивление усталости, число циклов и время работы металла до его разрушения изменяются при увеличении частоты нагружения, т. е. эти характеристики циклической прочности металла чувствительны к частоте нагружения.

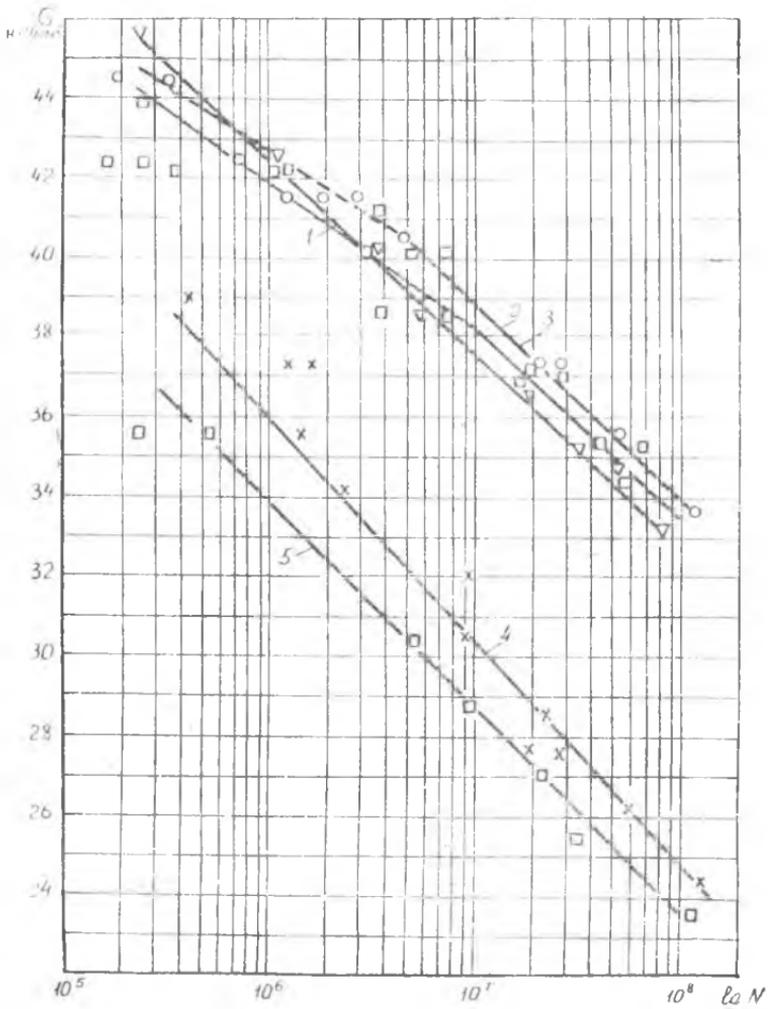
Сопротивление усталости на базе числа циклов исследованных сплавов в зависимости от их химсостава, структуры и физико-механических свойств, имеют максимальное значение в интервале частот нагружения от 1000 до 2000 гц (фиг. 8). Частоты нагружения, при которых наблюдается максимальное сопротивление усталости, будем называть критическими частотами. Дальнейшее повышение частоты нагружения за их критическую величину обуславливает снижение сопротивления усталости. Причем сопротивление усталости на базе времени с повышением частоты нагружения за их критическую величину снижается более резко, чем сопротивление на базе числа циклов (таблица 4). Например,



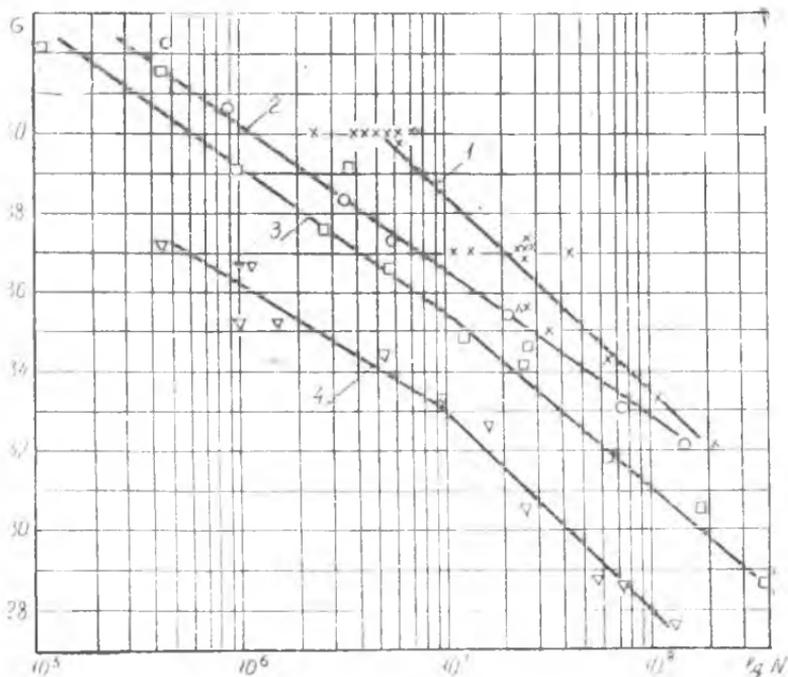
Фиг. 1. Кривые усталости сплава АК4-1 в зависимости от частоты нагружения, температура испытания 250°C
 1 — 1150 г; 2 — 2250 г; 3 — 2900 г.



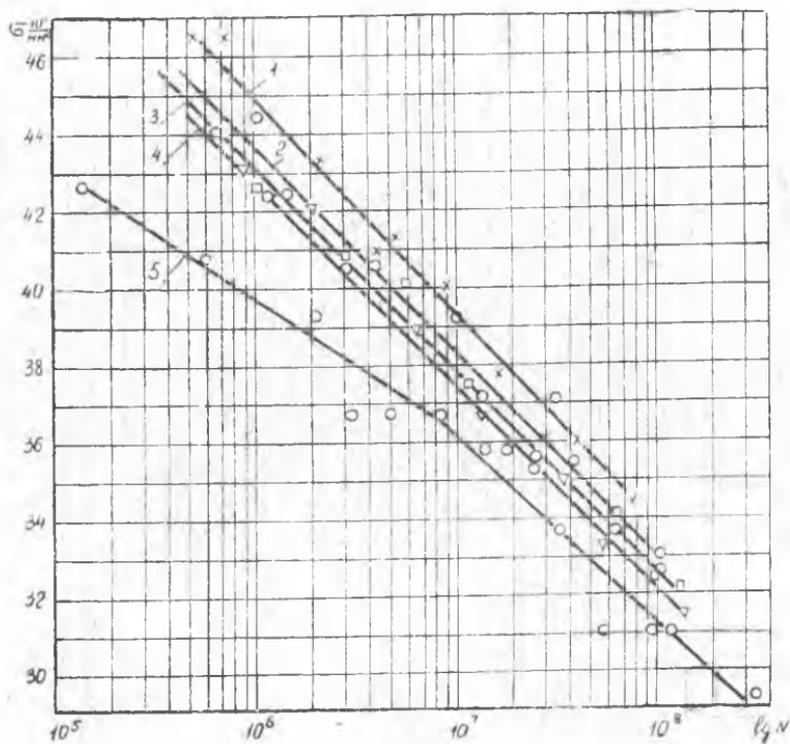
Фиг. 2. Кривые усталости сплава ВТ10 в зависимости от частоты нагружения, температура испытания 500°C
 1 — 1100 г; 2 — 2000 г; 3 — 2500 г; 4 — 3000 г.



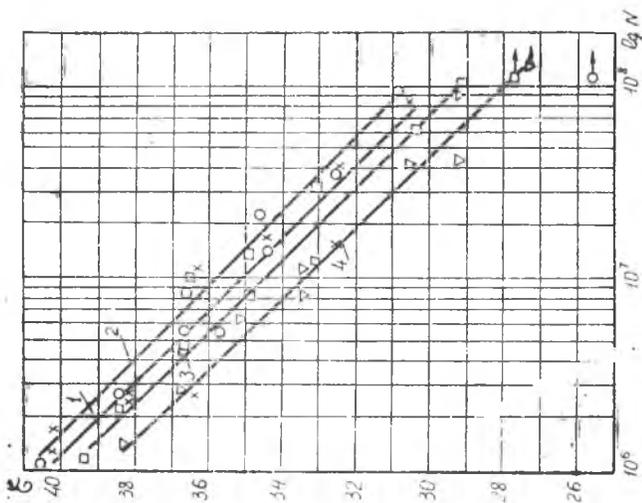
Фиг. 3. Кривые усталости стали ЭИ961 в зависимости от частоты нагружения, температура испытания 500°C и 550°C
 1 — 800 г; 2 — 1300 г; 3 — 2100 г; при 500°C; 4 — 1300 г; 5 — 2100 г — при 550°C.



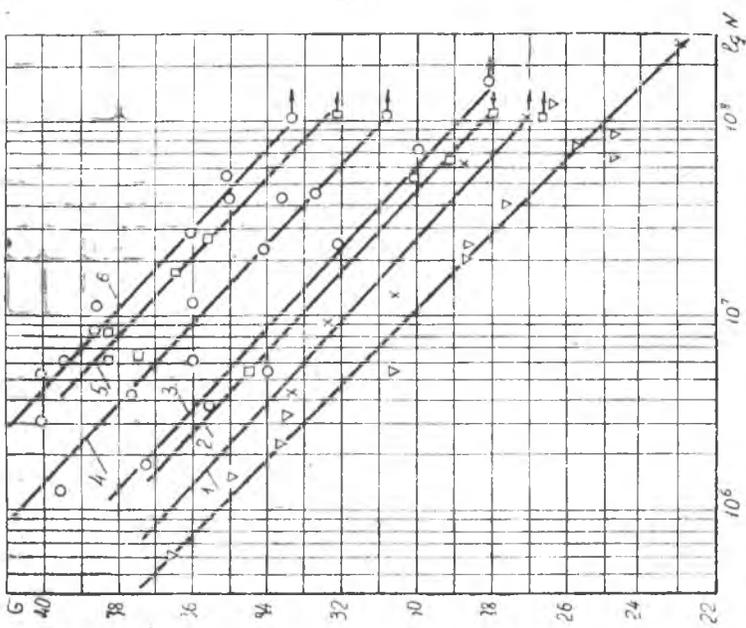
Фиг. 4. Кривые усталости сплава ЭИ867 при различных частотах нагружения, температура испытания 900°C.
 1 — 1100 гц; 2 — 3920 гц; 3 — 5000 гц; 4 — 10000 гц.



Фиг. 5. Кривые усталости сплава ЭП109 при различных частотах нагружения, температура испытания 900°C
 1 — 530 гц; 2 — 1020 гц; 3 — 1520 гц; 4 — 2100 гц; 5 — 5000 гц.

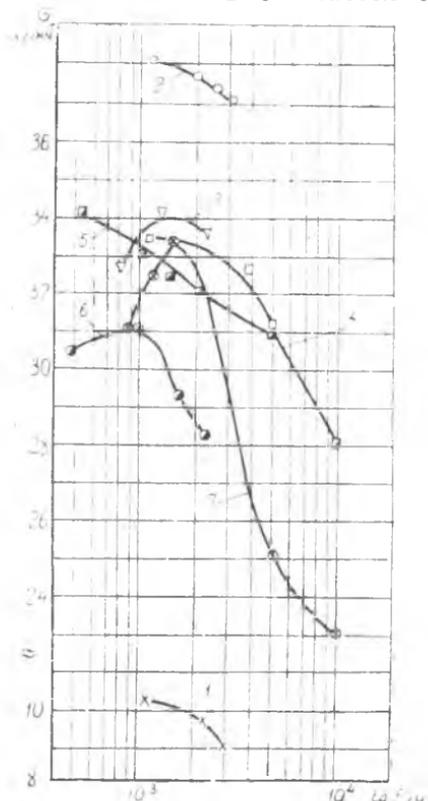


Фиг. 6. Кривые усталости сплава ЗИ929 при различных частотах нагружения, температура испытания 800°C
 1 — 480 гц; 2 — 920 гц; 3 — 1650 гц; 4 — 2500 гц.



Фиг. 7. Кривые усталости сплава ЖС6К при различных частотах нагружения, температура испытания 900°C.
 1 — 950 гц; 2 — 1420 гц; 3 — 1780 гц (обычная плавка); 4 — 880 гц;
 5 — 1250 гц; 6 — 1550 гц; 7 — 5000 гц (вакуумная плавка).

у сплава АК4-1 при температуре испытания 250°C с увеличением частоты нагружения от 1000 до 3000 гц сопротивление усталости на базе числа циклов снижается на 12%, сопротивление усталости на базе времени в этом интервале частот снижается на 31,5%. С увеличением частоты нагружения с 1000 до 5000 гц сопротивление усталости на базе числа циклов и времени при температуре испытания 900°C снижается соответственно у сплава ЭП109 на



Фиг. 8. Зависимости сопротивления усталости исследованных сплавов от частоты нагружения при базе испытания 10⁸ циклов

1 — АК4-1, 250°C; 2 — ВТ10, 500°C; 3 — ЭИ961, 500°C; 4 — ЭИ867, 900°C; 5 — ЭП109, 900°C; 6 — ЭИ929, 800°C; 7 — ЖС6К, 900°C.

900°C более чувствительным к частоте нагружения, чем деформируемые жаропрочные сплавы.

Повышение частоты нагружения при усталостных испытаниях оказывает влияние не только на сопротивление усталости, но влияет также и на число циклов колебаний и время испытания образца до их разрушения, т. е. на ресурс работы металла при циклическом нагружении.

Таблица 4

Снижение сопротивления усталости исследованных сплавов от частоты нагружения

№ п.п.	Марка сплава	Температура испытания, °С	Интервал частот нагружения при испытании, гц	Снижение сопротивления усталости в % от повышения частоты нагружения	
				база испытания 10 ⁸ циклов	база испытания 30 часов
1	АК4-1	250	1100—3000	12	31,5
2	ВТ10	500	1100—3000	3	7,5
3	ЭИ961	500	1300—2100	2	2
4	ЭИ867	900	1100—10000	16,5	29
5	ЭП109	900	530—5000	9	19
6	ЭИ929	800	900—2200	9	16
7	ЖС6К	900	1550—5000	25,5	32

9% и 19% и у сплава ЖС6К на 25,5% и 32%. У сплава ЭИ867 при температуре 900°C с изменением частоты нагружения от 1000 гц до 10000 гц сопротивление усталости на базе числа циклов и времени снижаются соответственно на 16,5% и 29%.

Литейный жаропрочный сплав ЖС6К (вакуумной плавки) оказался при температуре испытания

Для выявления этой зависимости были построены по результатам испытаний кривые изменения числа циклов колебаний образцов и времени испытания до их разрушения от частоты нагружения (таблица 5). При этом для каждого сплава изменения числа циклов и времени испытания до разрушения от частоты нагружения брались при одном напряжении, обычно соответствующем большой базе испытаний — 10^8 циклов или 10^5 секунд. Из таблицы 5 видно, что ресурс работы материала на усталость при данном уровне напряжений сильно зависит от частоты нагружения. Увеличение частоты нагружения после критической частоты, соответствующей максимальному сопротивлению усталости сплава при данной температуре, обуславливает резкое снижение числа циклов и времени до усталостного разрушения. Например, при усталостных испытаниях алюминиевого сплава АК4-1 (температура испытания 250°C и напряжение $\sigma = 12 \text{ кг/мм}^2$) и титанового сплава

Таблица 5

Изменение ресурса работы исследованных сплавов с повышением частоты нагружения при заданном уровне напряжений

№ п.п.	Марка сплава	Условия испытаний			Изменение ресурса работы металла с повышением частоты нагружения			
		температура испытания, $^\circ\text{C}$	напряжение, кг/мм^2	частота нагружения, гц	число циклов	в %	времени, сек	в %
1	АК4-1	250	12	1150	$4,2 \cdot 10^7$	100	$4 \cdot 10^4$	100
2	»	250	12	2250	$3,0 \cdot 10^7$	71	$1,5 \cdot 10^4$	37,5
3	»	250	12	2900	$1,8 \cdot 10^7$	43	$6,4 \cdot 10^3$	16,0
4	ВТ10	500	38	1100	$1 \cdot 10^8$	100	$1 \cdot 10^5$	100
5	»	500	38	2000	$7,6 \cdot 10^7$	76	$5 \cdot 10^4$	50
6	»	500	38	2500	$6 \cdot 10^7$	60	$3,3 \cdot 10^4$	33
7	»	500	38	3000	$5 \cdot 10^7$	50	$2 \cdot 10^4$	20
8	ЭИ961	500	34	800	$1 \cdot 10^8$	100	$7,2 \cdot 10^4$	100
9	»	500	34	1300	$7,8 \cdot 10^7$	78	$9 \cdot 10^4$	125
10	»	500	34	2100	$5,8 \cdot 10^7$	58	$4 \cdot 10^4$	55,5
11	ЭИ867	900	32	1100	$2 \cdot 10^8$	100	$1,9 \cdot 10^5$	100
12	»	900	32	3920	$1,5 \cdot 10^8$	75	$3,8 \cdot 10^4$	20
13	»	900	32	5000	$6 \cdot 10^7$	30	$1 \cdot 10^4$	5,5
14	»	900	32	10000	$1,7 \cdot 10^7$	85	$2 \cdot 10^3$	1
15	ЭП109	900	34	530	$9 \cdot 10^7$	100	$1,8 \cdot 10^5$	100
16	»	900	34	1020	$6,6 \cdot 10^7$	73	$6,3 \cdot 10^4$	35
17	»	900	34	1520	$5,8 \cdot 10^7$	64,5	$4 \cdot 10^4$	22
18	»	900	34	2100	$4,8 \cdot 10^7$	53	$2,3 \cdot 10^4$	12,5
19	»	900	34	5000	$3 \cdot 10^7$	33	$6,5 \cdot 10^3$	3,5
20	ЭИ929	800	30	480	$1 \cdot 10^8$	100	$2 \cdot 10^5$	100
21	»	800	30	920	$1,5 \cdot 10^8$	150	$1 \cdot 10^5$	50
22	»	800	30	1650	$7 \cdot 10^7$	70	$4,2 \cdot 10^4$	21
23	»	800	30	2200	$4,5 \cdot 10^7$	45	$2,3 \cdot 10^4$	11,5
24	ЖС6К	900	32	880	$2 \cdot 10^8$	100	$1,4 \cdot 10^5$	100
25	»	900	32	1250	$1,2 \cdot 10^8$	60	$9 \cdot 10^4$	64
26	»	900	32	1550	$6 \cdot 10^7$	30	$6,5 \cdot 10^4$	46,5
27	»	900	32	5000	$4,8 \cdot 10^6$	2,4	$9,5 \cdot 10^3$	6,8

ВТ10 (температура испытания 500°C и $\sigma=38 \text{ кг/мм}^2$) с повышением частоты нагружения от 1000 до 3000 *гц* число циклов и время до разрушения снижаются соответственно на 55—50% и 85—80%. У жаропрочных сплавов ЭП109 (при 900°C и $\sigma=34 \text{ кг/мм}^2$) и ЭИ867 (при 900°C и $\sigma=32 \text{ кг/мм}^2$) повышение частоты нагружения в материале 1000—5000 *гц* вызывает снижение числа циклов колебаний и времени до разрушения соответственно на 70% и 95%.

Влияние частоты нагружения на ресурс усталости литейного сплава ЖС6К (при 900°C и $\sigma=32 \text{ кг/мм}^2$) проявляется сильнее, чем у исследованных деформируемых жаропрочных сплавов.

В настоящее время отсутствуют глубокие исследования физических основ явления усталости металлов в условиях высокочастотного нагружения и рабочих температур. По этой причине невозможно дать полное объяснение выявленной зависимости сопротивления усталости от частоты нагружения.

Однако наблюдения и имеющийся опыт проведения высокочастотных усталостных испытаний позволяют высказать ряд соображений о влиянии частоты нагружения на сопротивление усталости металлов.

При высокочастотных усталостных испытаниях образец в зоне максимальных напряжений нагревается. Температура образца в этой зоне с увеличением частот нагружения и амплитуды напряжений возрастает. Нагрев образца в зоне разрушения связан с внутренним трением металла при циклическом нагружении.

С увеличением частоты нагружения растет скорость деформации металла. Тепло из зоны максимальных напряжений образца с увеличением скорости деформации не успевает отводиться, металл образца, особенно в зоне максимальных напряжений (т. е. в зоне разрушения), нагревается.

Следует полагать, что тепло, выделяемое в зоне максимальных напряжений при усталостных испытаниях, оказывает существенное влияние на снижение сопротивления усталости металла с повышением частоты нагружения.

Тепловой эффект усталости особенно обнаруживается у титановых сплавов.

Для выяснения рассеивания характеристик усталости жаропрочных сплавов при высокочастотном нагружении были испытаны сплавы ЭП57, ЖС6КП и ЖС6К на большой базе с определенным дисперсии на двух уровнях напряжений.

Сплавы ЭП57 (ЭИ929Б) и ЖС6КП испытывались с частотой нагружения 1200 *гц* на базе $5 \cdot 10^8$ циклов (более 100 часов) с определением дисперсии на двух уровнях напряжений, соответствующих 10^7 и 10^8 циклов. Температура испытания ЭП57— 900°C , а ЖС6КП— 975°C .

Сплав ЖС6К испытывался с частотой 1100 *гц* при температуре 975°C с определением дисперсии на двух уровнях напряжений, соответствующих $2 \cdot 10^6$ и $2 \cdot 10^7$ циклов.

Для определения дисперсии на каждом уровне напряжений испытывалось по 10—15 образцов. Образцы консольные, $\varnothing 7,52$ мм.

В таблице 6 приведены значения основных статистических характеристик усталости сплавов ЭП57, ЖС6КП и ЖС6К на двух уровнях напряжений. Кривые усталости исследуемых сплавов, построенные с учетом дисперсии, показаны на фиг. 9. Для каждого сплава на фиг. 9 показаны два вида кривых усталости: одна кривая построена непосредственно по экспериментальным точкам, полученным при последовательно снижающихся уровнях напряжений, вторая кривая построена по среднеарифметическим значениям, полученным на основании математической обработки результатов испытаний сплава на двух уровнях напряжений.

Анализ кривых усталости сплавов ЭП57, ЖС6КП и ЖС6К показывает, что кривые усталости, построенные по экспериментальным точкам, лежат почти в зоне доверительного интервала

Таблица 6

Статистические характеристики результатов усталостных испытаний сплавов ЭП57, ЖС6КП и ЖС6К на двух уровнях напряжений

№ п.п.	Наименование статистических характеристик	ЭП57, 900°C		ЖС6КП, 975°C		ЖС6К, 975°C	
		значения характеристик для уровня напряжений, кг/мм ²					
		38	33	30	24,5	34	30,5
1	Размах варьирования $R = X_{\max} - X_{\min}$	$8,5 \cdot 10^6$	$3,4 \cdot 10^7$	$4,9 \cdot 10^6$	$6,9 \cdot 10^7$	$0,89 \cdot 10^6$	$10,8 \cdot 10^6$
2	Среднее арифметическое ряда $\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$	$14,0 \cdot 10^6$	$10,0 \cdot 10^7$	$11,7 \cdot 10^6$	$11,9 \cdot 10^7$	$1,78 \cdot 10^6$	$21,4 \cdot 10^6$
3	Дисперсия $\sigma^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$	$7,95 \cdot 10^{13}$	$0,81 \cdot 10^{14}$	$2,976 \cdot 10^{12}$	$3,5 \cdot 10^{14}$	$0,109 \cdot 10^{12}$	$8,76 \cdot 10^{12}$
4	Среднее квадратическое отклонение ряда $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$	$2,81 \cdot 10^6$	$0,90 \cdot 10^7$	$1,725 \cdot 10^6$	$1,871 \cdot 10^7$	$2,96 \cdot 10^6$	$0,329 \cdot 10^6$
5	Средняя ошибка среднего значения $\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	$0,815 \cdot 10^6$	$0,26 \cdot 10^7$	$0,46 \cdot 10^6$	$0,485 \cdot 10^7$	$0,11 \cdot 10^6$	$0,986 \cdot 10^6$

Продолжение

№ п.п.	Наименование статистических характеристик	ЭП57, 900°C		ЖС6КП, 975°C		ЖС6К, 975°C	
		значения характеристик для уровня напряжений, кг/мм ²					
		38	33	30	24,5	34	30,5
6	Доверительный интервал при надежности $\alpha = 0,99$ $\epsilon = t_{\alpha} \cdot \sigma_x$	$2,5 \cdot 10^6$	$0,8 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^7$	$0,37 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^6$
7	Колебания среднего значения $\bar{X} - \epsilon < N < \bar{X} + \epsilon$	$14,0 \cdot 10^6 \pm \pm 2,5 \cdot 10^6$	$10,0 \cdot 10^7 \pm \pm 0,8 \cdot 10^7$	$11,7 \cdot 10^6 \pm \pm 1,4 \cdot 10^6$	$11,9 \cdot 10^7 \pm \pm 1,4 \cdot 10^7$	$1,78 \cdot 10^6 \pm \pm 0,37 \cdot 10^6$	$21,4 \cdot 10^6 \pm \pm 3,3 \cdot 10^6$

кривых усталости, построенных по среднеарифметическим значениям.

Исследуемые сплавы обладают большой стабильностью характеристик усталости при высокочастотных испытаниях. Расчетные значения доверительных интервалов для обоих уровней напряжений составляют 12—15% от среднего арифметического значения ряда при надежности $\alpha = 0,99$.

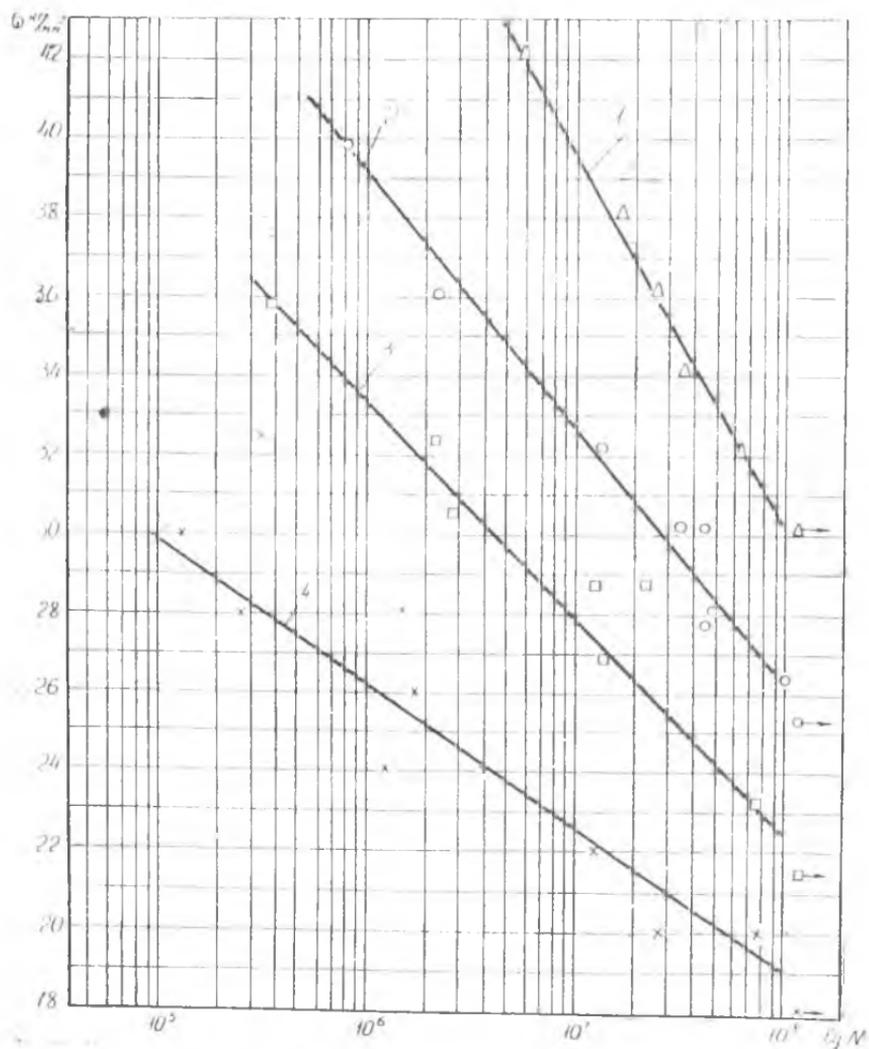
ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ОБРАЗЦА

Были испытаны на усталость образцы круглого, прямоугольного, трапецеидального и криволинейного поперечного сечения из сплава ЭИ617 с одинаковыми моментами сопротивления при изгибе. Испытания проводились при температуре 850°C и частоте нагружения 960 гц. Кривые усталости сплава ЭИ617 при различных формах поперечного сечения образца приведены на фиг. 10. Коэффициент влияния формы сечения на сопротивление усталости сплава приведен в таблице 7.

Таблица 7

Форма поперечного сечения образца	База $N = 10^7$ циклов	База $N = 10^8$ циклов
Круглые	1	1
Прямоугольные	0,82	0,87
Трапецеидальные	0,71	0,75
Криволинейные	0,55	0,63

Анализ поверхности изломов образцов показывает, что их разрушение, как правило, начинается от наиболее тонкой кромки. Микротрещина от начала ее появления до момента разрушения образца быстро развивается. Изломы образцов криволинейной фор-



Фиг. 10. Кривые усталости сплава ЗН617 при различных формах поперечного сечения образца. Температура испытания 850°C, частота нагружения 960 гц

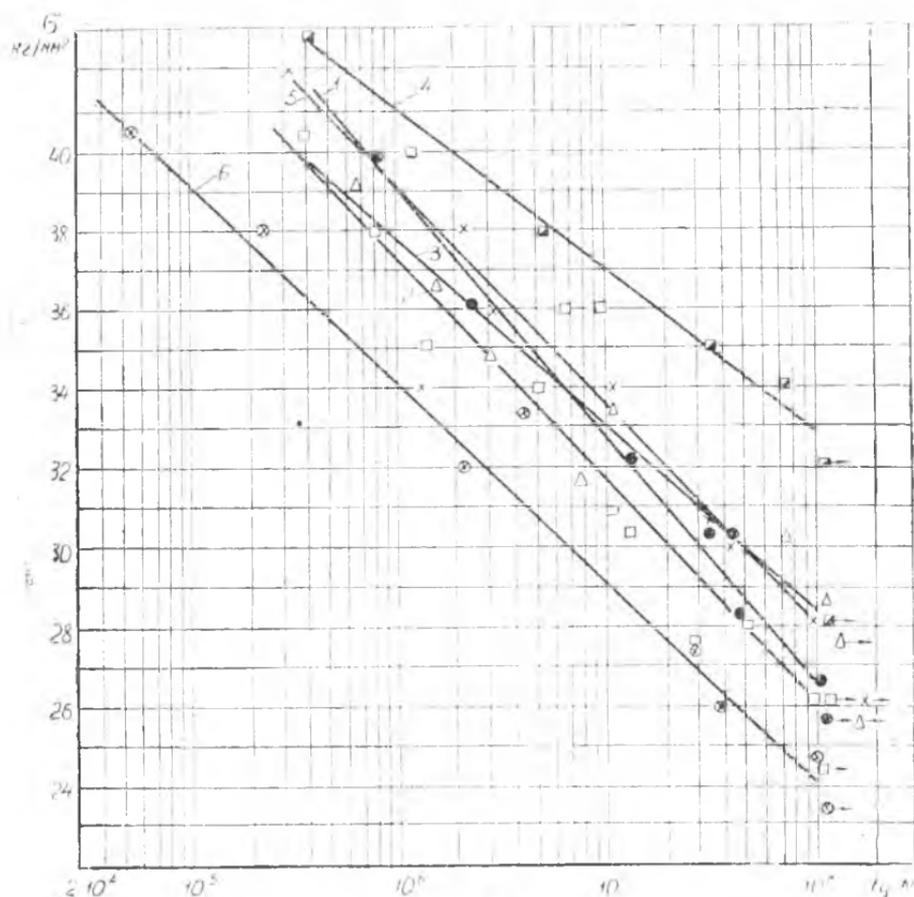
1 — круглая, 2 — прямоугольная, 3 — трапецидальная, 4 — криволинейная.

мы имеют сходство с эксплуатационными изломами лопаток газовой турбины реактивного двигателя, изготовленных из того же сплава, что подтверждает усталостный характер разрушения этих лопаток.

Коэффициент формы зависит от уровня напряжений: чем выше напряжение, тем сильнее влияние формы поперечного сечения образца на усталость материала.

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Влияние чистовых и отделочных методов обработки на усталость исследовано на плоских образцах из жаропрочных лопаточных сплавов ЭИ617 и ЭИ867 в условиях высоких температур



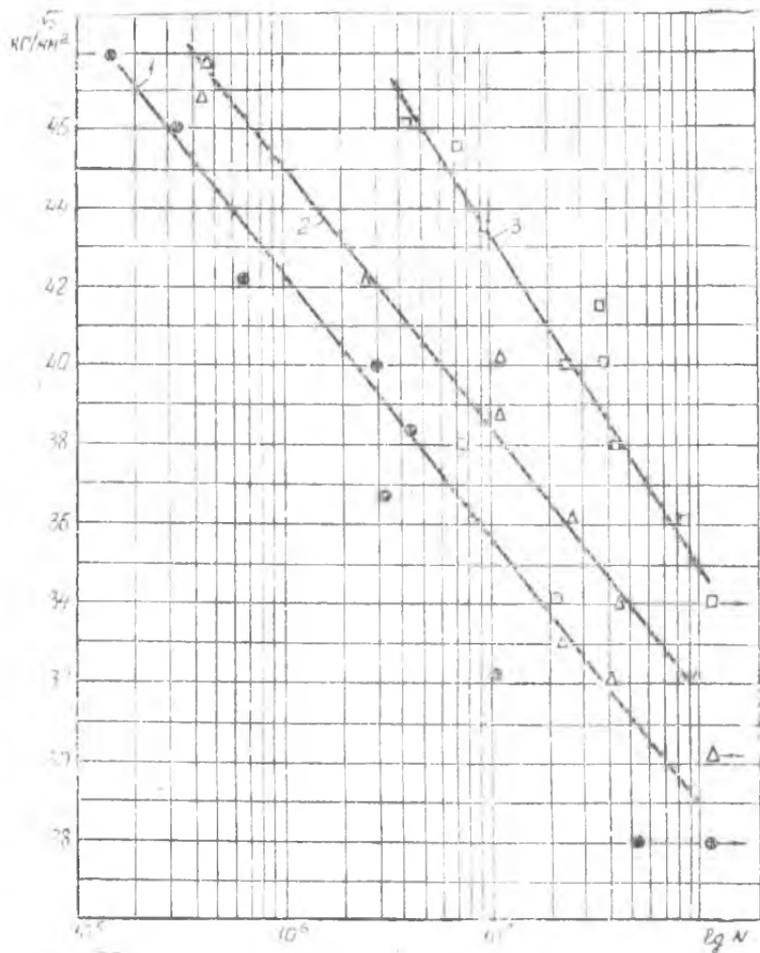
Фиг. 11. Кривые усталости сплава ЭИ617, в зависимости от методов обработки при температуре испытаний 850°C и частоте нагружения 960 гц.

1 — электрополирование; 2 — механическое полирование; 3 — шлифование; 4 — электрогидрополирование с последующим электрополированием; 5 — термическая обработка; 6 — механическое полирование после обработки фрезой с износом 0,8 — 1,2 мм.

и высокочастотного нагружения, приближающихся к реальным условиям работы лопаток в двигателе. Испытано 9 серий образцов: шесть из сплава ЭИ617 (I—IV, VI—VII) и три из сплава ЭИ867 (I, V и VI), обработанных различными методами, применяемыми в технологии серийного изготовления газотурбинных лопаток РД с производственными режимами (таблица 8).

Испытания на выносливость проводились при 850°C , частоте нагружения 960 гц на базе 100 млн. циклов. Кривые усталости приведены на фиг. 11 и 12.

Результаты испытаний показали, что сопротивление усталости сплавов ЭИ617 ЭИ867 и в зависимости от метода их обра-



Фиг. 12. Кривые усталости сплава ЭИ867 в зависимости от методов обработки при температуре испытаний 850°C и частоте нагружения 960 гц

1 — электрополирование; 2 — термическая обработка; 3 — электрогидрополирование с последующим электрополированием.

ботки может изменяться на 20—25%. Наибольшее значение сопротивление усталости для обоих сплавов обеспечивается электрогидрополированием с последующим электрополированием. При механическом полировании сопротивление усталости сплава ЭИ617 снижается до 5% по сравнению с электрополированием. Фрезерование с последующим механическим полированием по

Таблица 8

№ серий образцов	Метод обработки	Припуск на сторону, мм	Режим обработки					Примечание
			V , м	$V_{кр}$, м	$S_{мин}$, мм	S , мм	охлаждение	
			мин.	сек.	мин	дв. ход		
I	Фрезерование с последующим шлифованием, механическим полированием и электрополированием	0,5	4	—	32	—	эмульсия то же	
		0,3	—	25	—	0,005		
		0,05	—	25	—	ручн.		
		0,02	—	—	—	—		
II	Фрезерование с последующим шлифованием и механическим полированием	0,5	4	—	32	—	эмульсия то же	
		0,3	—	25	—	0,005		
		0,05	—	25	—	ручн.		
III	Фрезерование с последующим шлифованием	0,5	4	—	32	—	эмульсия то же	
		0,3	—	25	—	0,005		
IV	Фрезерование с последующим механическим полированием	0,8	4	—	70	—	эмульсия	
		0,03	—	25	—	ручн.		
V	Фрезерование с последующим электрогидрополированием и электрополированием	0,5	4	—	32	—	эмульсия	
		0,5	—	—	—	—		
		0,02	—	—	—	—		
VI	Фрезерование с последующим шлифованием, механическим полированием и термообработкой	0,5	4	—	32	—	эмульсия то же	
		0,3	—	25	—	0,005		
		0,03	—	25	—	ручн.		
VII	Фрезерование с последующим электрогидрополированием	0,5	4	—	32	—	эмульсия	
		0,6	—	—	—	—		

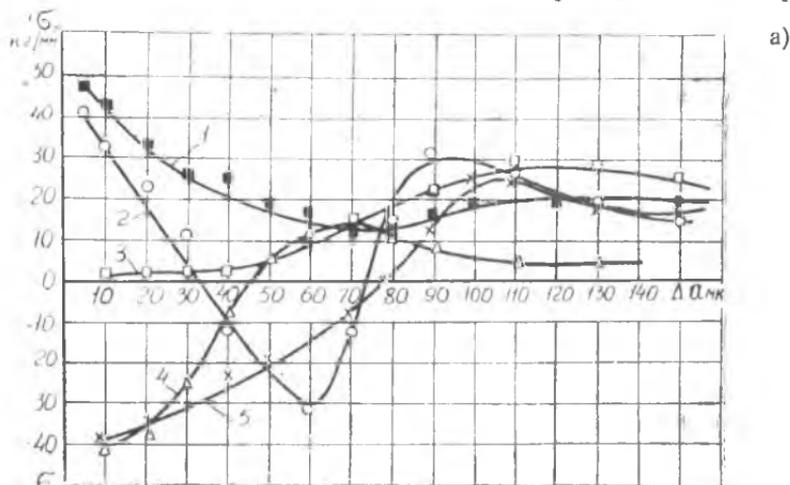
Износ фрезы до 0,8—1,2 мм

Примечание: Термообработка образцов серии VI производилась по следующему режиму: сплав ЭИ617 — нагрев при температуре 950°C в течение 2,5 часов в среде аргона. Старение при 800°C в течение 8 часов; сплав ЭИ867 — нагрев при температуре 950°C в течение 2 часов с последующим охлаждением на воздухе.

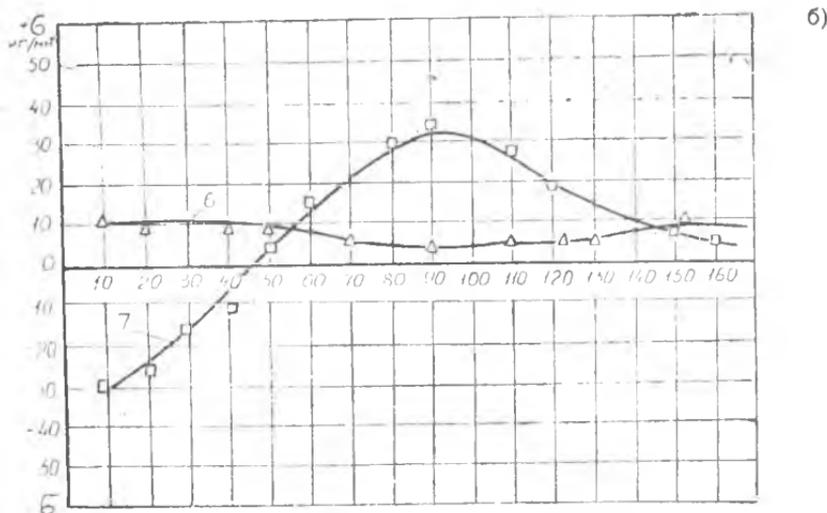
сравнению с электрополированием снижает сопротивление усталости сплава до 10%.

Термообработка образцов для снятия остаточных напряжений перед испытанием оказала положительное влияние на выносливость.

Для установления связи между технологическими факторами и параметрами качества поверхности в образцах были определены глубина наклепа и величина остаточных напряжений в поверхно-



Фиг. 13а



Фиг. 13б. Эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из сплава после обработки:

а — сплава ЭИ617 (1 — шлифование; 2 — фрезерование с последующим механическим полированием; 3 — электрополирование; 4 — механическое полирование с последующей термической обработкой; 5 — механическое полирование); б — сплав ЭИ867 (1 — механическое полирование с последующей термической обработкой; 2 — электрополирование).

стном слое после обработки. Данные по глубине наклепа приведены в таблице 9. Величина и характер распределения остаточных напряжений показаны на фиг. 13.

Результаты исследования качества поверхности, обусловленного различными методами обработки, а также результаты испытаний на усталость при высокочастотном нагружении в условиях высоких температур показывают, что с повышением глубины наклепа сопротивление усталости исследуемых сплавов заметно снижается (образцы серии IV сплава ЭИ617).

Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости зависит от величины и знака напряжений. Растягивающие остаточные напряжения значительно снижают выносливость сплавов при температурах испытаний, не вызывающих явления возврата (отдыха).

Чтобы правильно оценить влияние остаточных напряжений на выносливость сплавов при испытаниях в условиях высоких температур, необходимо знать, не произошла ли их релаксация при этих температурах.

Для изучения влияния затупления инструмента на выносливость сплава ЖС6К при условии концентратора напряжений было испытано три серии образцов прямоугольного сечения с двухсторонним поперечным надрезом, выполненным в соответствии с

Таблица 9

Марка сплава	Вид обработки	Номера серий образцов	Глубина распространения деформированного слоя в м.к	Характеристика рентгенограмм
ЭИ617	Фрезерование тупой фрезой (износ по задней грани от 0,8 до 1,2 мм) с последующим декоративным механическим полированием	IV	290	Сильная текстура, деформации распространяются на глубину 150 мк. Дополнительно на 60 мк распространяется слабо деформированный слой, далее — следы деформации. Исходная структура — крупнозернистая
ЭИ617	Шлифование	III	60	Сильно деформированный поверхностный слой, с увеличением глубины постепенно уменьшается степень деформации. Исходная структура — крупнозернистая
ЭИ617	Механическое полирование	II	50	То же
ЭИ617	Электрополирование	I	15	Следы деформации. Исходная структура — крупнозернистая
ЭИ617	Механическое полирование с последующей термообработкой	XI	30	Слабо деформированный поверхностный слой. Исходная структура — крупнозернистая

Марка сплава	Вид обработки	Норма серий образцов	Глубина распространения деформированного слоя в м.м.	Характеристика рентгенограмм
ЭИ617	Электрогидрополирование	VI	10	Следы деформации. Исходная структура — крупнозернистая
ЭИ867	Механическое полирование с последующей термообработкой	XI	20	На поверхности сохранен наклеп в тонком слое, под которым просвечивает недеформированный слой
ЭИ867	Механическое полирование	II	18	Поверхность — сильно деформированный слой, глубина распространения которого не более 18 мк. Исходная структура — относительно мелкозернистая
ЭИ867	Электрогидрополирование	VI		Структуры поверхностных слоев и на глубине 20 мк одинаковы. Линии состоят из мелких точек относительно мелкозернистой структуры

формой паза елочного замка лопатки газовой турбины реактивного двигателя. В первой серии образцов надрез выполнен острой фрезой (износ фрезы по задней грани не превышал 0,1 мм), во второй серии надрез выполнен затупленной фрезой (износ фрезы по задней грани составлял 0,1—0,3 мм), в третьей серии надрез обработан затупленной фрезой с последующей термообработкой по режиму: нагрев до температуры 950°C в аргоне, выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе.

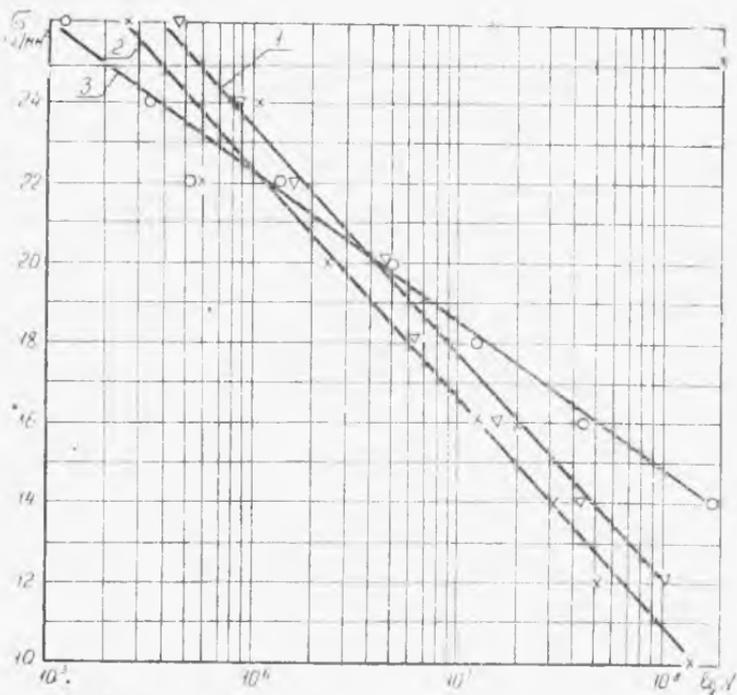
Усталостные испытания образцов из сплава ЖС6К с концентратором напряжений проводились при температуре 780°C и частоте нагружения 2200 гц на базе 100 млн. циклов. Полученные в результате испытаний кривые (фиг. 14) показывают, что с увеличением затупления фрезы сопротивление усталости сплава ЖС6К заметно снижается. При увеличении износа фрезы до 0,3 мм снижение сопротивления усталости достигало 10%. Термическая обработка образцов повышает их сопротивление усталости.

Экспериментальное значение эффективного коэффициента концентрации для сплава ЖС6К составляет

$$K_z = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1H}} = \frac{26}{18,5} = 1,4,$$

где σ_{-1} — сопротивление усталости образцов без надреза;

σ_{-1H} — сопротивление усталости образцов с надрезом.



Фиг. 14. Кривые усталости сплава ЖС6К в зависимости от затупления инструмента в условиях концентрации напряжения
 1 — обработка острой фрезой (износ фрезы $\delta \leq 0,1$ мм); 2 — обработка затупленной фрезой (износ фрезы $\delta = 0,1-0,3$ мм); 3 — обработка затупленной фрезой ($\delta = 0,1-0,3$ мм) с последующей термической обработкой.

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОНЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Испытанные на усталость образцы подвергались макро- и микроскопическому исследованию в зоне разрушения. Излом образцов имел типично усталостный характер.

Исследование микроструктуры зоны разрушения образцов испытанных сплавов показало, что усталостная трещина возникает от наибольших нормальных напряжений и развивается в глубь образца перпендикулярно действию этих напряжений. Независимо от частоты нагружения усталостная трещина зарождалась на поверхности зерна и развивалась по телу зерна, меняя свое направление в пределах отдельных зерен.

Развитие трещин по телу зерна объясняется тем, что при напряжениях, меньших предела текучести, накопление критической деформации в рабочем микрообъеме путем перемещения по границам зерен происходит медленно и процессы диффузии настолько упрочняют границы зерен, что они оказываются прочнее тела зерен.

Упрочнение в теле зерна при напряжениях, меньших предела текучести, происходит менее интенсивно, так как в этих условиях интенсивность образования дислокаций уменьшается, а продолжительность диффузии вакансий к микропорам и их коагуляция возрастают.

Данным металлографическим исследованием не обнаружено существенных структурных изменений в зависимости от частоты нагружения, амплитуды напряжения и числа циклов.

ВЫВОДЫ

1. Сопротивление усталости исследованных сплавов меняется в зависимости от частоты нагружения, конструктивных и технологических факторов.

2. Частота нагружения оказывает существенное влияние на сопротивление металла усталостному разрушению. Сопротивление усталости исследованных сплавов имеет максимум в интервале частот нагружения 1000—2000 гц. Дальнейшее увеличение частоты нагружения снижает сопротивление усталости.

3. Число циклов колебаний и время испытания до усталостного разрушения металла (база испытания) при одном уровне напряжений с повышением частоты нагружения уменьшаются, т. е. ресурс работы металла при одном уровне напряжений с повышением частоты нагружения примерно от 1000 гц сокращается.

4. Жаропрочные сплавы ЭП57, ЖС6КП и ЖС6К обладают большой стабильностью характеристик усталости при высокочастотном нагружении. Расчетные значения доверительных интервалов для двух уровней напряжений составляют 12—15% от среднего арифметического значения ряда при надежности $\alpha=0,99$.

5. Наиболее рациональной геометрической формой поперечного сечения образца в отношении усталостной прочности (сплава ЭИ617) оказалась круглая, а самое низкое сопротивление усталости было получено при криволинейной форме, близкой к форме сечения лопаток газовых турбин.

6. Состояние режущей кромки фрезы, применяющейся для выполнения надреза на образцах из сплава ЖС6К, влияет на предел выносливости. Увеличение затупления фрезы до 0,3 мм снижает сопротивление усталости сплава на 10%. Термообработка по принятому в исследованиях режиму после механической обработки надреза повышает сопротивление усталости сплава ЖС6К на 37%.

7. При принятой форме надреза коэффициент чувствительности сплава ЖС6К к надрезу в условиях высокочастотного вибрационного нагружения и высокой температуры $\gamma=0,3$. Эффективный коэффициент $K_\sigma = 1,4$.

8. Усталостная трещина возникает от наибольших нормальных напряжений и развивается в глубь образца перпендикулярно действию этих напряжений. Независимо от частоты нагружения

усталостная трещина зарождается на поверхности зерна и развивается по телу зерна, меняя свое направление в пределах отдельных зерен.

9. При испытании на усталость в условиях высокочастотного нагружения и рабочих температур за характеристику усталости принималось сопротивление усталости с указанием базы испытаний: числа циклов или времени. Сопротивление усталости — напряжение в момент разрушения образца. База испытаний — число циклов или время испытания образца до разрушения при данном напряжении.
