

УДК 669.14.018.44

**Е.Р. Голубовский, А.Г. Демидов****ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, Россия**

## ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ И КРИТЕРИЙ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЙ СПЛАВА ЭИ698ВД ДЛЯ ДИСКОВ ГТД

*Представлены результаты испытаний на длительную прочность тонкостенных трубчатых образцов (тип 2) из сплава ЭИ698ВД при температурах 650 и 750 °С в условиях различных напряженных состояний. Эти данные использованы для определения эмпирического критерия эквивалентности напряженных состояний. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что наиболее адекватно длительную прочность при сложном напряженном состоянии при температуре 650 °С описывает обобщенный критерий, сформулированный авторами ранее; а при температуре 750 °С - критерий Мизеса - Генки. Показано, что длительная прочность зависит от параметров масштабного фактора. Для оценки этой зависимости использованы также экспериментальные данные, полученные ранее на трубчатых образцах (тип 1) с другим соотношением толщины стенки и среднего диаметра. Показано, что с увеличением параметра масштабного фактора пределы длительной прочности при кручении увеличиваются на 3 - 15%.*

**Ключевые слова:** трубчатые образцы, длительная прочность, критерий эквивалентности напряженных состояний, масштабный фактор.

### Введение

При расчетах напряженно-деформированного состояния основных деталей АГТД используются критерии эквивалентности напряженных состояний. В качестве таких критериев используются либо известные теории прочности, либо однопараметрические критерии, либо эмпирические двухпараметрические критерии [1]. В современных программных комплексах (типа ANSYS, NASTRAN и др.) применяется, как правило, однопараметрический критерий Мизеса-Генки:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_{\text{с}} = \sigma_i, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  — интенсивность напряжений.

В работах [2-4] показано, что более точные оценки эквивалентных напряжений длительной прочности при сложном напряженном состоянии для деформируемых никелевых сплавов, применяемых для таких ответственных деталей АГТД как диски турбины и компрессора, позволяет получить обобщенный критерий эквивалентности напряженных состояний:

$$\sigma_{\text{эКВ}}^{\tau} = \lambda \sigma_i^{\tau} + 3(1 - \lambda) \sigma_0^{\tau}, \quad (2)$$

где  $\sigma_i^{\tau}$  и  $\sigma_0^{\tau}$  — интенсивность напряжений и среднее напряжение соответственно при долговечности  $\tau$ ;

$\lambda$  — параметр материала  $\left(\frac{2}{3} < \lambda < 2\right)$ .

В настоящей работе были поставлены следующие задачи:

- экспериментально исследовать длительную прочность при сложном напряженном состоянии сплава ЭИ698ВД, широко применяемого для дисков и валов компрессора и турбины различных АГТД и ГТУ при температурах 650 и 750 °С;

- по результатам эксперимента определить значение параметра  $\lambda$  обобщенного критерия (2) и получить численные модели длительной прочности при сложном напряженном состоянии для температур 650 и 750 °С (т.е. зависимость времени до разрушения от эквивалентного напряжения) для определения значений характеристик длительной прочности в условиях кручения и кручения с растяжением.

- оценить возможное влияние масштабного фактора на параметр  $\lambda$  и, как следствие, влияние на уровень характеристик длительной прочности при кручении.

### 1. Экспериментальная часть

Трубчатые образцы (тип 2) для испытаний на длительную прочность при сложном напряженном состоянии имели следующие размеры рабочей части — наружный и внутренний диаметры соответственно  $D_{\text{нар}} = 18$  мм,  $D_{\text{внутр}} = 17$  мм и расчетная длина  $L = 100$  мм. Для оценки влияния масштабного фактора использованы результаты испытаний трубчатых образцов (тип 1), испытанных ранее [2,3]; образцы (тип 1) имели

рабочую часть с размерами -  $D_{нар} = 8$  мм,  $D_{внутр} = 6$  мм, расчетная длина  $L = 25$  мм.

В качестве заготовок для образцов тип 2 был использован металл серийных штамповок дисков из деформируемого никелевого сплава ЭИ698ВД, термообработанных по стандартному режиму [5]. Аналогичные штамповки были использованы ранее для изготовления трубчатых образцов (тип 1). Для оценки и идентификации этого металла (для корректного сравнения с результатами испытаний образцов тип 1) были проведены испытания стандартных сплошных образцов ( $d = 5$  мм и  $L = 5d = 25$  мм) на длительную прочность в условиях одноосного растяжения при температуре  $650$  °С (рис. 1) и проведено сопоставление этих результатов испытаний со справочными кривыми длительной прочности стандартных образцов были проведены на испытательных машинах АИМА-5. Результаты испытаний стандартных образцов и сопоставление со справочными кривыми длительной прочности представлены на рис. 1. Как следует из этого рисунка, металл штамповок полностью соответствует справочным кривым длительной прочности.

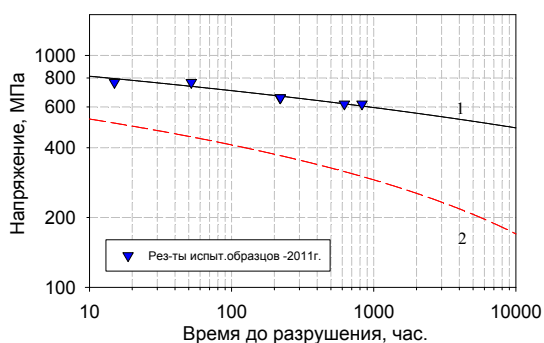


Рис. 1. Справочные кривые длительной прочности сплава ЭИ698ВД при температурах  $650$  °С (1) и  $750$  °С (2) [5]. Треугольники – результаты испытаний стандартных образцов, полученных в настоящей работе

Испытания трубчатых образцов (тип 2) при температурах  $650$  и  $750$  °С на длительную прочность в условиях растяжения, кручения и кручения с растяжением были проведены на машине УИМТ-1500. Методика испытаний и обработки полученных экспериментальных данных подробно описана в [4].

## 2. Полученные результаты и их обсуждение

Результаты испытаний трубчатых образцов (тип 2) и результаты их предварительной обработки приведены в табл. 1, 2. Экспериментальные данные, представленные в этих таблицах были обработаны по степенной модели длительной прочности:

$$\tau_p = A\sigma_{экр}^{-n}$$

После логарифмирования она принимает вид:

$$\log \tau_p = \log A - n \log \sigma_{экр} \quad (3)$$

Таблица 1  
Экспериментальные данные, полученные при  $T = 650$  °С, и результаты их обработки

Напряжения, МПа						$\tau_p$ , час	$\sigma_{экр.}$ , МПа *
$\sigma_{xx}$	$\tau_{xy}$	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_i$	$\sigma_0$		
667	0	667	0,0	667	222	46	667
637	0	638	0,0	638	213	307	638
618	0	618	0,0	618	206	95	618
618	0	618	0,0	618	206	189	618
618	0	618	0,0	618	206	152	618
657	0	657	0,0	657	219	279	657
657	0	657	0,0	657	219	43	657
618	0	618	0,0	618	206	756	618
510	0	510	0,0	510	170	357	510
0,0	392	392	-392	680	0,0	51	654
0,0	357	357	-357	618	0,0	1194	595
0,0	435	435	-435	754	0,0	15,5	726
380	319	561	-181	670	127	369	659
380	319	561	-181	670	127	134	659
380	319	561	-181	670	127	60	659
510	163	557	-478	583	170	815	580
347	291	512	-165	612	116	1109	601
454	380	669	-216	800	151	0,1 **	786

\* - расчет по критерию (2);

\*\* - потеря устойчивости образца

На первом этапе в качестве эквивалентного напряжения в уравнении (3) был использован критерий эквивалентности Мизеса-Генки (1).

Раздельно были обработаны следующие выборки результатов испытаний на растяжение: выборка 1 и выборка 2 для температур  $650$  и  $750$  °С соответственно.

Далее раздельно были обработаны выборки 3 и 4 для температур  $650$  и  $750$  °С соответственно – только результаты испытаний образцов при кручении и кручении с растяжением. Полученные численные значения коэффициентов уравнения регрессии (3) для температур  $650$  и  $750$  °С представлены в табл. 3.

Таблица 2  
Экспериментальные данные, полученные при  $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и результаты их обработки

Напряжения, МПа						$\tau_p$ , час	$\sigma_{\text{экв.}}$ по $\sigma_i$ МПа
$\sigma_{xx}$	$\tau_{xy}$	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_i$	$\sigma_0$		
422	0,00	422	0,00	422	141	31	422
422	0,00	422	0,00	422	141	22	422
314	0,00	314	0,00	314	105	227	314
245	0,00	245	0,00	245	82	525	245
245	0,00	245	0,00	245	82	426	245
314	0,00	314	0,00	314	105	235	314
196	0,00	196	0,00	196	65	571	196
147	113	208	-61	245	49	956	245
167	140	246	-79	294	56	552	294
213	179	315	-102	376	71	120	376
213	179	315	-102	376	71	120	376
287	240	423	-137	506	96	12,5	506
287	240	423	-137	506	96	48	506
167	140	246	-79	294	56	264	294
188	144	267	-78	313	63	303	313
179	150	264	-85	316	60	360	316
147	113	208	-61	245	49	720	245
0,00	135	135	-135	235	0,0	763	235
0,00	173	173	-173	300	0,0	120	300
0,00	189	189	-189	328	0,0	248	328
0,00	142	142	-142	245	0,0	432	245
0,00	222	222	-222	385	0,0	153	385
618	0,00	618	0,00	618	206	2,8	618
471	0,00	471	0,00	471	157	31,5	471
392	0,00	392	0,00	392	131	67,5	392
343	0,00	343	0,00	343	114	426	343
341	0,00	341	0,00	341	114	371	341

Таблица 3  
Значения коэффициентов уравнения (3) для эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_i$  (трубчатые образцы – тип 2)

Напряженное состояние	№ выборки	$T, ^{\circ}\text{C}$	$\log A$	$n$
растяжение	1	650	142,3	50,0
	2	750	17,0	5,88
Сложное напряженное состояние	3	650	92,45	32,26
	4	750	15,22	5,14

Кривые длительной прочности, построенные по уравнению (3) с этими значениями коэффициентов, приведены на рис. 2 а, б.

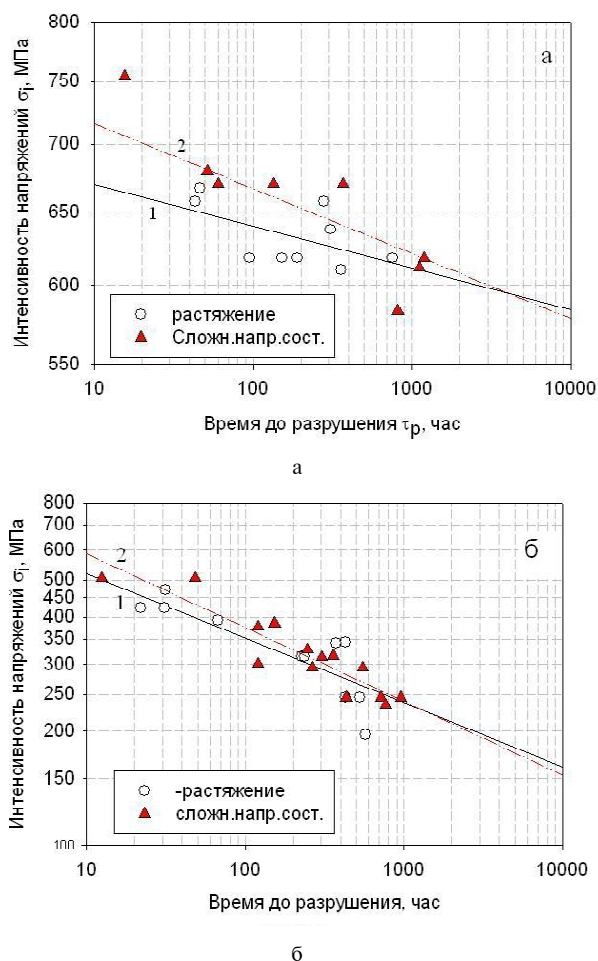


Рис. 2. Сплав ЭИ698ВД. Трубчатые образцы тип 2. Температуры 650 °С (а) и 750 °С (б)  
1 – Кривая длительной прочности при растяжении;  
2 – Кривая длительной прочности при кручении и кручении с растяжением

Кривые длительной прочности свидетельствуют о том, что при температуре 650 °С (рис. 2 а) критерий Мизеса-Генки неудовлетворительно описывает экспериментальные данные при кручении и кручении с растяжением, т.е. кривые 1 и 2 значительно различаются. В то же время, при температуре 750 °С (рис. 2 б) в области эксперимента, наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных кривых длительной прочности при растяжении и сложном напряженном состоянии, т.е. кривые 1 и 2 различаются незначительно. На основании этого результата было принято решение о применении для расчета эквивалентных напряжений при температуре 750 °С критерия (1), а при температуре 650 °С - критерия (2). Для этого необходимо определить значения параметра  $\lambda$  из критерия (2) по результатам испытаний трубчатых образцов (тип 2) при растя-

жении и иных напряженных состояниях. С этой целью, для долговечности каждого образца, испытанного при кручении и кручении с растяжением, по кривой длительной прочности при растяжении трубчатых образцов (рис. 2) были определены значения величины  $\sigma_r$  ( $\sigma_r$  - предел длительной прочности трубчатых образцов при растяжении, соответствующий времени до разрушения образца, испытанного при сложном напряженном состоянии).

С использованием этих значений  $\sigma_r$  были определены значения параметра  $\lambda$  из критерия (1) для каждого образца из сплава ЭИ698ВД по методике, изложенной в работе [4]. Результирующее значение  $\lambda$  определяется как среднее арифметическое всех значений, полученных для каждого образца. После выполнения этих процедур, для образцов (тип 2) параметр  $\lambda$  из критерия (2) для сплава ЭИ698ВД имеет среднее значение:

$$\lambda = 0,963 \quad (4)$$

По формуле (2) с  $\lambda$  (4) были рассчитаны эквивалентные напряжения  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  для каждого образца (тип 2), испытанного при температуре 650 °С – эти значения приведены в табл. 1. Аналогичные процедуры были выполнены для результатов испытаний, полученных при температуре 750 °С, но с использованием в качестве критерия эквивалентности - критерия Мизеса-Генки (1) (см. табл. 2).

Полученные величины  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  и соответствующие им экспериментальные данные  $\tau_p$  (табл. 1 и 2) были использованы для определения численных значений коэффициентов уравнения (3) и последующего построения кривых длительной прочности в соответствующих эквивалентных напряжениях. Значения коэффициентов приведены в табл. 4, а кривые длительной прочности - на рис. 3.

Таблица 4

Значения коэффициентов уравнения (3) в эквивалентных напряжениях для температур 650 и 750 °С  
(Трубчатые образцы – тип 2 и тип 1)

T, °С	Критерий эквивалентности	log A	n
650	(Все трубч. образцы–тип 2) Критерий (2) - $\lambda=0.963$	93,67	32,57
	(Трубч. образцы–тип 1) Критерий (2)- $\lambda=0,861$ [2]	38,41	12,87
750	(Все трубч. образцы–тип 2) Критерий Мизеса-Генки $\sigma_e = \sigma_i$	16,61	5,71

В табл. 4 приведены также значения коэффициентов уравнения (3) для образцов тип 1, полученные по результатам испытаний, проведенных ранее [2]. Эти два типоразмера образцов (тип 2 и тип 1) можно охарактеризовать параметром масштабного фактора, отнесенного к единице длины рабочей части образца. В качестве такого масштабного фактора можно использовать отношение толщины стенки трубчатого образца к среднему диаметру:

$$\Delta = (D_{\text{нар}} - D_{\text{внутр}}) / (D_{\text{нар}} + D_{\text{внутр}})$$

Значения масштабного фактора D приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения параметров масштабного фактора  $\Delta$  для трубчатых образцов тип 1 и тип 2

Тип образца	$\Delta = (D_H - D_B) / (D_H + D_B)$
Тип 1	0,143
Тип 2	0,029

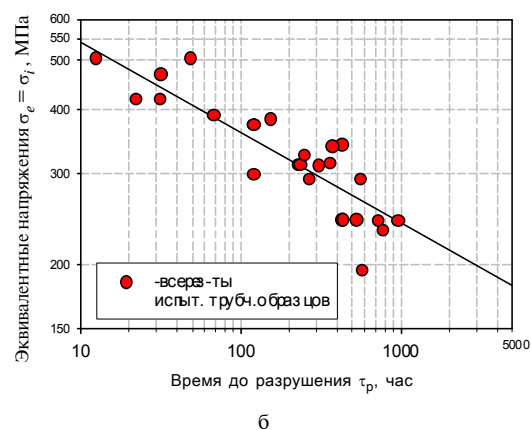
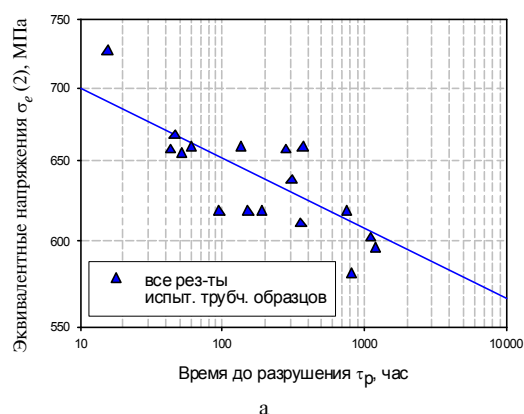


Рис. 3. Сплав ЭИ698ВД. Трубчатые образцы тип 2. T = 650 °С (а) и 750 °С (б). Кривые длительной прочности в эквивалентных напряжениях  $\sigma_e$  (2) и  $\sigma_e = \sigma_i$  (1) по результатам испытаний образцов при растяжении, кручении и кручении с растяжением

Как следует из сравнения коэффициентов уравнения (3), представленных в табл. 4, величины  $\log A$  и  $n$  для образцов тип 1 имеют значения в 2.5 раза ниже, чем для образцов тип 2. Сопоставляя значения величин, представленных в табл. 4 и 5, можно сделать вывод об общей тенденции – с уменьшением масштабного фактора снижаются значения коэффициентов уравнения (3). Кроме того, снижаются значения пределов длительной прочности в главных напряжениях ( $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ ) для образцов тип 2 в сравнении с образцами тип 1, рассчитанные по уравнению (3) с использованием соответствующих параметров  $\lambda$  (табл. 4).

Для более детального изучения этого феномена, связанного в том числе и с возможностью значительно более окисленного слоя в более тонких образцах (тип 2), необходимо металлографическое и микроструктурное исследование поперечного сечения образцов тип 1 и тип 2.

### 3. Заключение

На основании полученных экспериментальных данных показано, что длительную прочность сплава ЭИ698ВД в условиях сложного напряженного состояния при  $T = 650^\circ\text{C}$  описывает критерий (2) с параметром  $\lambda = 0.963$ , а при  $T = 750^\circ\text{C}$  – критерий (1).

Оценка влияния масштабного фактора  $\Delta$  позволила установить при  $T = 650^\circ\text{C}$ , что с увели-

чением  $\Delta$  снижается параметр  $\lambda$  в критерии (2) и при этом увеличиваются пределы длительной прочности в главных напряжениях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11-08-00008а)

### Литература

1. Лебедев А.А. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии [Текст] / А.А. Лебедев, Б.И. Ковальчук, Ф.Ф. Гигиняк, В.П. Ламашевский // Киев, Изд. дом. «Ин Юре», 2003. - 540 с.
2. Голубовский Е.Р. Оценка длительной прочности при сложном напряженном состоянии никелевых сплавов с поликристаллической и монокристаллической структурами [Текст] / Голубовский Е.Р., Подъячев А.Н. // Проблемы прочности. – 1991. - №6. - С.17-22.
3. Каблов Е.Н. Жаропрочность никелевых сплавов [Текст]: моногр. / Е.Н. Каблов, Е.Р. Голубовский. – М.: Машиностроение, 1998. – 464 с.
4. Голубовский Е.Р. Оценка длительной прочности при сложном напряженном состоянии сплава ЭИ437 БУ-ВД для дисков ГТД [Текст] / Е.Р. Голубовский, А.Г. Демидов // Вестник двигателестроения. -2008. -№3. –С. 106-110.
5. Авиационные материалы [Текст]: справ. Т. 3.- Ч. 1. Деформируемые жаропрочные стали и сплавы. - М.: ОНТИ ВИАМ, 1989 г.

Поступила в редакцию 01.06.2012

### E.R. Golubovskiy, A.G. Demidov. Stress rupture and criterion of equivalence stress states conditions of alloy ЭИ698ВД for disks GTE

*Results of tests for long durability of thin-walled tubular samples (type 2) from alloy ЭИ698ВД are submitted at temperatures 650 and 750° C in conditions of various conditions. These data are used for definition empirical criteria of equivalence of intense stress states conditions. Experimental data testify that is the most adequate long durability at a complex stress state at temperature 650 °C describes the generalized criterion formulated by authors earlier; and at temperature 750 °C - criterion Muzeca - Genkas. It is shown, that long durability depends on parameters of the scale factor. For an estimation of this dependence the experimental data received earlier on tubular samples (type 1) with other parity{ratio} of thickness of a wall and average diameter are used also. It is shown, that with increase in parameter of the scale factor limits of long durability at torsion was increased.*

**Key words:** tubular samples, long durability, criterion of equivalence of intense conditions, the scale factor.