

УДК 629.7036

А.В. ШЕРЕМЕТЬЕВ, Н.Н. КОСТИН, О.В. СУЛЬДИНА

ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НА БОЛЬШИЕ РЕСУРСЫ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ КОНВЕРТИРУЕМЫХ ГТД

В работе проанализирована применимость используемых авиационных материалов на большие ресурсы (50000...100000 ч) для дисков двигателей наземного применения. Для дисков с наработкой 20000...30000 час. приведены результаты экспериментальных исследований одного из материалов – ЭИ698-ВД. Выполнен анализ полученных результатов испытаний. При этом получено незначительное изменение свойств этого материала, что не препятствует дальнейшему увеличению ресурса дисков. Выполнен анализ возможности дальнейшей эксплуатации дисков и показано, что нужно делать для увеличения их ресурса.

**Ключевые слова:** ресурс, испытания, гладкие образцы, образцы с надрезом, длительная прочность, диски турбин.

### Введение

В последние годы получило значительное развитие использование авиационных двигателей, отработавших свой ресурс для наземного применения. Так, например, двигатели разработки ГП «Ивченко-Прогресс» Д-136, АИ-20, АИ-25, Д-18Т после отработки в эксплуатации используются в газотурбинных приводах, двигателях наземного применения: Д-336-1, Д-336-2, Д-336-2Т, АИ-336-2-8, Д-336-1-4, Д-336-2-4, АИ-2500, МСТ-198.

При этом приходится решать проблемы обеспечения прочности и ресурса деталей конвертируемых двигателей. Одним из важных вопросов работоспособности конвертируемых двигателей является вопрос применимости используемых материалов на большие ресурсы (50000...100000 час.). Изучить механическое повреждение материала в соответствующих условиях испытаний при продолжительности десятков тысяч часов не представляется возможным прежде всего из-за существенных временных и материальных затрат. Поэтому в статье рассмотрены методы прогнозирования работоспособности материала на большие ресурсы и приведены результаты экспериментальных исследований сплава ЭИ698-ВД после отработки в эксплуатации 20000...30000 час.

### 1. Определение характеристик длительной прочности материала на большие ресурсы

При анализе работоспособности материалов на большие ресурсы используются температурно-вре-

менные параметры (ТВП). Одним из самых распространенных ТВП является параметр Ларсена-Миллера [1]:

$$P_{Л-М} = \frac{\Delta H}{R} = T \cdot (C_{Л-М} + \lg t_p), \quad (1)$$

где  $T$  – температура, К;  $t_p$  – время до разрушения, час.;  $C_{Л-М}$  – постоянная, составляющая в общем случае от 15 до 30 в зависимости от сплава;  $\Delta H$  – энергия активации ползучести;  $R$  – газовая постоянная.

Уравнение кривой длительной прочности материала может быть записано в виде:

$$\sigma_{дл} = F(P_{Л-М}). \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения (2) могут быть рассчитаны методом средних квадратических отклонений в виде полинома [2]:

$$\lg \sigma = A_1 + A_2 \cdot P_{Л-М} \cdot 10^{-3} + A_3 \cdot (P_{Л-М} \cdot 10^{-3})^2 + \dots + A_n \cdot (P_{Л-М} \cdot 10^{-3})^{n-1}. \quad (3)$$

Для определения коэффициентов  $A_n$  в уравнении (3) используются статистически значимые результаты испытаний образцов на длительную прочность.

Рассчитанная таким образом кривая длительной прочности сплава может быть использована для интерполяционного определения характеристик длительной прочности в пределах обследованного интервала температур и экстраполяции по времени и по температуре в небольших пределах [2]. За этими пределами экстраполяционное определение характеристик длительной прочности может давать существенные погрешности.

Поскольку практически используемые диапазоны температурно-временного интервала приме-

ния сплавов существенно превышают исследованный диапазон, то всегда возможны погрешности в определении долговечности.

Даже при отсутствии экстраполяции за пределы исследуемого диапазона, самому методу предсказания времени до разрушения с использованием ТВП (всего их более 30) присущи несоответствия с реальными данными вследствие [1]:

1) упрощенного рассмотрения теоретических и расчетных посылок, которые лежат в основе каждого параметра;

2) не учитывается существенное влияние структурных изменений в материале;

3) не учитывается влияние дефектов (в частности металлургических).

## 2. Результаты экспериментального исследования характеристик материала с наработкой 20000...30000 ч

В разделе 1 приведены причины, в соответствии с которыми необходим периодический контроль свойств материала после длительной эксплуатации.

Такой периодический контроль свойств материалов дисков, как для двигателей авиационного применения, так и для двигателей наземного применения, производится на ГП «Ивченко-Прогресс». В последнее время таким исследованиям уделяется все больше внимания. Это связано с увеличением ресурсов деталей авиационных двигателей и двигателей наземного применения в эксплуатации и при проектировании новых двигателей.

Одно из последних исследований дисков турбины для наземного использования проведено для дисков 1 и 2 ступеней силовой турбины (СТ) изделия МСТ-198 из сплава ЭИ698-ВД, наработка которых составила 22435 час.

Следует отметить, что наработка данного изделия продолжает увеличиваться. На сегодняшний день несколько экземпляров МСТ-198 отработали в составе двигателей наземного применения больше, чем по 40000 час.

После изъятия из эксплуатации дисков с наработкой 22435 час., был проведен их внешний осмотр, контроль ЛЮМ1-ОВ, контроль геометрических характеристик для определения остаточных деформаций в ступичной и ободной части. При этом вытяжка дисков практически не обнаружена.

Затем диски были порезаны на 3 кольца, чтобы исследовать свойства в различных зонах этих деталей – ступице, ободной части и полотне. Из колец были изготовлены образцы для испытаний.

Всего из 2 дисков было изготовлено больше 100 образцов различного типа, предназначенных для различных исследований.

Для испытаний на длительную прочность из диска 1 ступени СТ было изготовлено 25 образцов. Из них – 10 гладких образцов (6 образцов из ободной части и 4 образца из ступицы диска), 12 образцов с надрезом  $R_n = 0,15$  мм (6 образцов из ободной части и 6 образцов из ступицы диска) и 3 плоских образца из полотна диска.

Для испытаний на длительную прочность из диска 2 ступени СТ был изготовлен 21 образец. Из них - 8 гладких образцов (4 образца из ободной части и 4 образца из ступицы диска), 10 образцов с надрезом  $R_n = 0,15$  мм (6 образцов из ободной части и 4 образца из ступицы диска) и 3 плоских образца из полотна диска.

Плоские образцы толщиной 2,5 мм (6 штук) обычно не исследуются для дисков, но из-за малой толщины полотна такие испытания были проведены.

Для испытаний на малоцикловую усталость из диска 1 ступени СТ было изготовлено 11 гладких образцов (6 образцов из ободной части и 5 образцов из ступицы диска).

Для испытаний на малоцикловую усталость из диска 2 ступени СТ было изготовлено 12 гладких образцов (6 образцов из ободной части и 6 образцов из ступицы диска).

Для сравнения механических свойств сплава ЭИ698-ВД для новых дисков и свойств материала дисков 1 и 2 ступеней СТ, отработавших более 22000 час., были проведены испытания при  $t = 20$  °С и 650 °С по определению предела прочности, предела текучести, относительного удлинения, относительного сужения, ударной вязкости и твердости материала ЭИ698-ВД.

Для гладких образцов и образцов с надрезом  $R_n = 0,15$  мм проведены испытания на длительную прочность при  $t = 650$  °С. Для гладких образцов проведены испытания на малоцикловую усталость при  $t = 650$  °С и  $t = 550$  °С. Результаты испытаний образцов при  $t = 20$  °С и 650 °С, вырезанных из диска 1 ступени СТ, по определению предела прочности, предела, текучести, относительного удлинения и относительного сужения сплава ЭИ698-ВД, приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов, вырезанных из диска 1 ступени СТ при  $t = 20$  °С

Место вырезки	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Обод	1239	836	27,2	28,6
	1234	832	26,8	27,2
	1239	836	26,4	27,7
Ступица	1217	874	17,6	19,0
	1238	856	20,0	21,7
	1217	874	18,2	19,0

Таблица 2

Результаты испытаний образцов, вырезанных из диска 1 ступени СТ при  $t = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$

Место вырезки	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Обод	1137	820	18,6	20,2
	1129	846	16,0	20,8
	1122	832	22,8	22,9
Ступица	1087	847	18,6	25,7
	1097	844	19,6	22,3
	1102	849	20,4	22,3

Результаты испытаний образцов при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , вырезанных из диска 2 ступени СТ, приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов, вырезанных из диска 2 ступени СТ при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Место вырезки	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Обод	1218	825	21,8	22,9
	1218	837	22,0	22,9
	1218	833	22,8	22,9
Ступица	1259	816	24,6	24,9
	1259	829	24,6	24,6
	1264	829	24,4	24,6

Таблица 4

Результаты испытаний образцов, вырезанных из диска 2 ступени СТ при  $t = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$

Место вырезки	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Обод	1107	829	22,4	24,9
	1112	822	20,0	22,3
Ступица	1122	830	22,4	25,4
	1056	764	18,6	22,0

Результаты испытаний на длительную прочность гладких образцов и образцов с надрезом  $R_H = 0,15\text{ мм}$ , изготовленных из дисков 1 и 2 ступеней СТ МСТ-198, приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

Результаты испытаний гладких образцов на малоцикловую усталость при температурах  $t = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  представлены в виде кривых МЦУ, рассчитанных методом средних квадратических отклонений [2] и приведены на рис. 3 и 4 соответственно.

На рисунках также нанесены точки, полученные по результатам испытаний. Напряжения заданы в безразмерном виде.

Кривые МЦУ, построенные по результатам испытаний, находятся выше кривых МЦУ на сплав ЭИ698-ВД по имеющимся данным с учетом разброса свойств («3 $\sigma$ »).

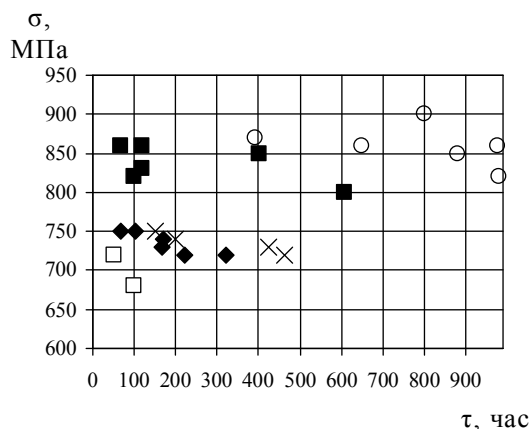


Рис. 1. Результаты испытаний образцов, вырезанных из диска 1 ступени СТ, на длительную прочность:

◆ – гладкие образцы из ободной части диска; ■ – образцы с надрезом  $R_H = 0,15\text{ мм}$  из ободной части диска; × – гладкие образцы из ступицы диска; ○ – образцы с надрезом  $R_H = 0,15\text{ мм}$  из ступицы диска; □ – минимальные свойства сплава ЭИ698-ВД

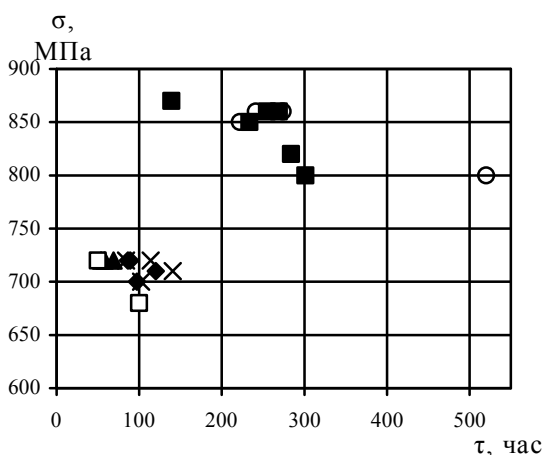


Рис. 2. Результаты испытаний образцов, вырезанных из диска 2 ступени СТ, на длительную прочность:

◆ – гладкие образцы из ободной части диска; ■ – образцы с надрезом  $R_H = 0,15\text{ мм}$  из ободной части диска; × – гладкие образцы из ступицы диска; ○ – образцы с надрезом  $R_H = 0,15\text{ мм}$  из ступицы диска; □ – минимальные свойства сплава ЭИ698-ВД

Поэтому результаты испытаний не препятствуют дальнейшему увеличению ресурса дисков.

Длительная прочность материала дисков, полученная при испытаниях, превосходит минимальные свойства материала ЭИ698-ВД для новых дисков.

На диске 1 ступени СТ время выдержки образцов при нагрузке до разрушения превышает минимальное в 4,4...9,2 раза, для диска 2 ступени СТ – в 1,6...2,2 раза.

Отличие в результатах испытаний образцов из дисков 1 и 2 ступеней СТ обусловлено различием исходных свойств этих дисков.

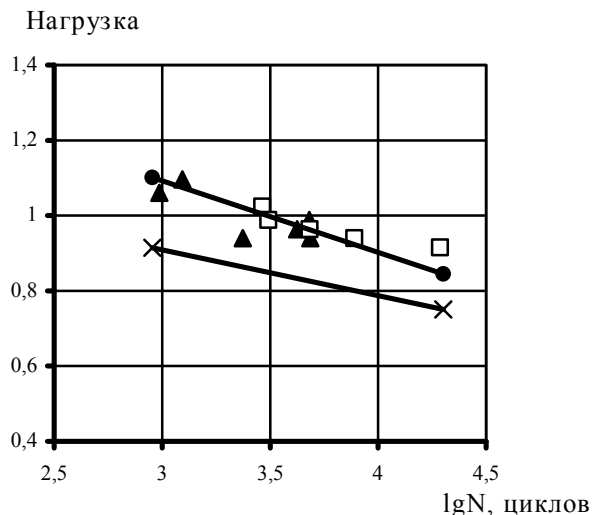


Рис. 3. Результаты испытаний гладких образцов на малоцикловую усталость при  $t = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  
 ▲ – результаты испытаний образцов из ободной части диска; □ – результаты испытаний образцов из ступицы диска; ● – кривая МЦУ для всех образцов; × – кривая МЦУ по имеющимся данным с учетом разброса свойств («3σ»)

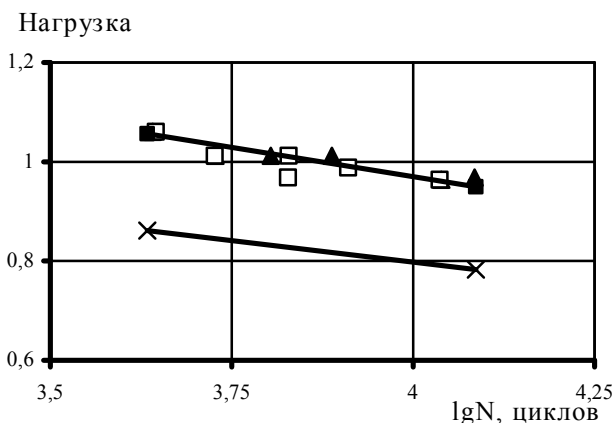


Рис. 4. Результаты испытаний гладких образцов на малоцикловую усталость при  $t = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  
 ▲ – результаты испытаний образцов из ободной части диска; □ – результаты испытаний образцов из ступицы диска; ● – кривая МЦУ для всех образцов; × – кривая МЦУ по имеющимся данным с учетом разброса свойств («3σ»)

Особенностью испытания образцов из диска 1 ступени явилось то, что длительность до разрушения для образцов из ступицы была в несколько раз выше, чем из ободной части. Это связано с более высоким уровнем температур ободной части диска 1 ступени СТ, что привело к его некоторым структурным изменениям.

Для диска 2 ступени такой разницы по длительности не получено, что вызвано меньшим перепадом и более низким уровнем температур.

Материал дисков не проявил чувствительности к концентраторам напряжений. При испытаниях образцов с надрезом ( $R_H = 0,15\text{ мм}$ ,  $\alpha_\sigma = 3,35$ ) получено соотношение:

$$1,2 \geq \frac{\sigma_{100}^H}{\sigma_{100}} \geq 1,1, \quad (4)$$

где  $\sigma_{100}^H$  – предел длительной прочности образцов с надрезом;  $\sigma_{100}$  – предел длительной прочности гладких образцов.

Следует отметить, что соотношение 1,1 между уровнем напряжений испытания образцов с надрезом и гладких образцов выдержано только для нескольких образцов, для большей части испытанных образцов – 1,2.

Анализ результатов определения кратковременных механических свойств материала обоих дисков при комнатной температуре показал их соответствие минимальным требованиям для новых дисков.

При этом пределы прочности и текучести образцов из сплава ЭИ698-ВД для обоих дисков имеют отличия на 4...11% от величин, определенных до начала эксплуатации для образцов из заготовок этих дисков.

Такая разница обусловлена местом и направлением вырезки образцов из диска.

При  $t = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$  механические свойства сплава ЭИ698-ВД также соответствовали данным для новых дисков. При этом предел текучести для обоих дисков получен выше на 12...14% от требуемого для новых дисков.

Результаты испытаний показали, что свойства материала дисков превосходят минимальные свойства материала ЭИ698-ВД.

С увеличением наработки ухудшение свойств материала будет прогрессировать и после наработки более 50000 ч потребуются восстановительная термообработка.

В частности, для материала ЭИ698-ВД в [3] рекомендуют следующий режим термообработки: отжиг при  $820 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  с выдержкой 2...3 час. и последующим старением при  $775 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 16 час.

## Заключение

1. Методу прогнозирования времени до разрушения с использованием ТВП присущи несоответствия с реальными данными.

2. В процессе отработки больших величин ресурсов (50000 ...100000 час.) следует проводить

исследования по контролю ухудшения свойств материала.

3. Исследование материала дисков турбины ЭИ698-ВД после наработки более 22000 ч показало незначительное ухудшение свойств материала, которое не препятствует дальнейшему продолжению эксплуатации дисков.

4. Для восстановления свойств материала целесообразно проводить восстановительные термообработки.

## Литература

1. Херцберг. Деформация и механика разрушения материалов конструкций / Херцберг. – М.: Машиностроение, 2002. – 376 с.

2. Ресурсное проектирование авиационных ГТД. Труды ЦИАМ № 1253.

3. Основы конвертирования авиационных ГТД в газотурбинных установках наземного применения / Н.Д. Кузнецов, Е.А. Гриценко, В.П. Дашавченко, В.Е. Резник. – Самара, 1995. – 320 с.

Поступила в редакцию 12.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ВИЗНАЧЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ НА ВЕЛИКІ РЕСУРСИ МАТЕРІАЛІВ ДЕТАЛЕЙ КОНВЕРТОВАНИХ ГТД

*О.В. Шереметьєв, М.М. Костін, О.В. Сульдіна*

В роботі проаналізовано застосування авіаційних матеріалів, які використовуються на великі ресурси (50000...100000 год.) для дисків двигунів наземного застосування. Для дисків, що працювали 20000...30000 год., приведені результати експериментальних досліджень одного з матеріалів – ЭИ698-ВД. Виконано аналіз одержаних результатів досліджень. Одержано незначні зміни властивостей цього матеріалу, що не перешкоджає подальшому збільшенню ресурсу дисків. Виконано аналіз можливості подальшої експлуатації дисків і показано, що потрібно робити для збільшення їхніх ресурсів.

**Ключові слова:** ресурс, випробування, гладкі зразки для випробувань, зразки з надрізом, довготривала міцність, диски турбін.

## THE DETERMINATION OF THE WORKABLENESS PARTS MATERIALS FOR INDUSTRIAL GTE ON THE LARGE SERVICE LIFE

*A. V. Sheremetyev, N. N. Kostin, O. V. Suldina*

In paper there was analyzed applicableness of used aviation materials on the large service lives (50.000...100.000 ours) for the industrial engines discs. For the discs with the working time 20.000...30.000 ours there was presented experimental research results of AI-698 material. There was done the analyse of the obtained testing results. Hereby there was obtained a very small changing of the material properties that doesn't setback for further increase of service life. There was done the analysis of further discs exploitation possibility and it was shown what is necessary to do for the increasing of service life.

**Key words:** service life, tests, smooth samples, notched samples, longtime strength, turbine discs.

**Шереметьєв Александр Викторович** – канд. техн. наук, начальник отдела ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко», Запорожье, Украина.

**Костин Николай Николаевич** – ведущий конструктор ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина.

**Сульдіна Олеся Владимировна** – инженер-конструктор ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина.