

УДК 669.14.018.44:539.4

Е.Р. ГОЛУБОВСКИЙ¹, А.С. ВОЛКОВ², С.Н. ВОЛКОВ², А.Г. ДЕМИДОВ¹,
Е.Н. ГВОЗДЕВА¹, Л.А. ЛАРИОНОВА²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова", Москва, Россия

²ОАО «РУСПОЛИМЕТ», Кулебаки, Нижегородская обл., Россия

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ (МЦУ И СРТУ) МЕТАЛЛА ШТАМПОВОК ДИСКОВ ИЗ СПЛАВА ЭИ698ВД ПРОИЗВОДСТВА ОАО «РУСПОЛИМЕТ»*

Представлены результаты экспериментального исследования малоциклового усталости (МЦУ) и трещиностойкости (СРТУ) металла массивных штамповок дисков из сплава ЭИ698ВД при температурах 20 и 650^oС. Получены численные значения коэффициентов степенной модели МЦУ для гладких образцов и образцов с надрезом для каждой температуры. Определены численные значения параметров уравнения Пэриса для второго участка кинетической диаграммы скорости роста трещины (СРТУ). Приведены расчётные кривые МЦУ и СРТУ. Показано удовлетворительное соответствие расчёта, эксперимента и справочных данных.

Ключевые слова: никелевый сплав, штамповка диска, образцы, малоцикловая усталость, скорость роста трещины усталости.

* Статья подготовлена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – проект № 08-08-00142а

Введение

Для дисков роторов газотурбинных двигателей широко применяется деформируемый никелевый сплав ЭИ698ВД [1]. Известно, что особенности технологии производства штамповок дисков, их геометрия и размеры могут влиять на величину механических характеристик, разброс свойств и, как следствие, на уровень характеристик конструкционной прочности. При ресурсном проектировании дисков роторов используются характеристики конструкционной прочности - характеристики малоциклового усталости (МЦУ) и скорости роста усталостной трещины (СРТУ). Поэтому в статье представлены результаты исследований этих характеристики металла штамповок дисков, полученных по технологии и на оборудовании ОАО «РУСПОЛИМЕТ»

1. Экспериментальная часть

1.1. Образцы для испытаний

Образцы были изготовлены из массивных штамповок дисков из сплава ЭИ698 ВД. Размеры штамповок: диаметр штамповки $\varnothing_{шт.} = 558$ мм, диаметр ступицы $\varnothing_{ст.} = 260$ мм, диаметр отверстия в

ступице $\varnothing_{отв.} = 124$ мм, высота ободной части и полотно $h = 7$ мм, высота ступицы $h = 127,5$ мм.

Следует отметить, что значения стандартных характеристик металла этих штамповок (ударная вязкость a_n при 20 °С; предел прочности σ_B , предел текучести $\sigma_{0,2}$, пластичность δ и ψ при температурах 20, 650 и 750 °С) в радиальном и хордовом направлениях превышают справочные данные [1]. Время до разрушения при испытаниях на длительную прочность превышает справочную [1] норму времени ($\sigma^{650} = 72$ кгс/мм²) более чем в 1,5 – 6 раз для образцов в радиальном и хордовом направлениях. Эти данные были получены по результатам испытаний в ЦЗЛ ОАО «РУСПОЛИМЕТ», которая аттестована и аккредитована органом Авиарегистра МАК.

Для испытаний на МЦУ были использованы цилиндрические гладкие образцы (расчётная длина рабочей части $l = 24$ мм, диаметр $\varnothing_{ст.} = 5$ мм) и образцы с надрезом (диаметр рабочей части $\varnothing_{ст.} = 12$ мм, диаметр в сечении надреза $\varnothing_{ст.} = 5$ мм, угол раскрытия надреза 60°, радиус в вершине надреза $\rho = 0,15$ мм). Заготовки для образцов МЦУ, вырезались в радиальном и хордовом направлениях. В выборке образцов для испытаний на МЦУ радиальные и хордовые образцы из ступицы и полотна были представлены в равных долях.

Для испытаний на СРТУ были использованы компактные СТ-образцы размером 50×50×10 мм на внецентренное растяжение. Заготовки для этих образцов вырезались таким образом, чтобы надрез с

начальной трещиной был ориентирован или в радиальном, или в хордовом направлениях.

1.2. Методика испытаний

Испытания всех образцов были проведены на машинах УМЭ-10Т с печью радиационного нагрева при осевом циклическом нагружении и при температурах 20 и 650 °С. Частота нагружения $f = 0,1$ Гц. Коэффициент асимметрии напряжений в цикле $R_\sigma = 0$. Форма цикла – близкая к синусоидальной.

Испытания на МЦУ гладких образцов и образцов с надрезом были проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502 [2]. Испытания проводились до разрушения образцов.

Испытания на трещиностойкость компактных СТ-образцов были проведены в соответствии с требованиями ОСТов [3,4]. Измерение приращения длины трещины на боковой грани компактного СТ-образца проводилось оптическим методом через окно в печи нагрева с применением оптического катетометра. Испытания проводились до разрушения образцов.

1.3. Методика обработки результатов испытаний

Для обработки результатов испытаний на МЦУ была использована степенная модель:

$$N_f * (\Delta\sigma_N)^n = C, \quad (1)$$

где N_f – число циклов до разрушения; $\Delta\sigma_N$ – размах напряжений в цикле; C, n – константы.

Модель (1) может быть преобразована в уравнения для расчёта числа циклов до разрушения или для расчёта предела МЦУ на заданной базе числа циклов до разрушения соответственно:

$$N_f = C * (\Delta\sigma_N)^{-n}, \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_N = [C * (N_f)^{-1/n}]. \quad (3)$$

После логарифмирования уравнения (2), (3) имеют вид:

$$\lg N_f = a_0 + a_1 * \lg(\Delta\sigma_N) \quad (\text{где } a_0 = \lg C, a_1 = -n); \quad (2.1)$$

$$\lg(\Delta\sigma_N) = b_0 + b_1 * \lg N_f \quad (2.2)$$

$$(\text{где } b_0 = (1/n) * \lg C, b_1 = -(1/n) * \lg N_f). \quad (3.1)$$

Для построения кривой МЦУ в координатах $\lg(\Delta\sigma_N) - \lg N_f$ и определения численных значений коэффициентов уравнений (2), (3), (2.1), (3.1) методом наименьших квадратов были использованы выборки результаты испытаний образцов при температурах 20 и 650 °С. Были также получены оценки дисперсии $S^2(\log N_f)$ и среднеквадратичного отклонения (с.к.о.) $S(\log N_f)$, характеризующие отклонение экспериментальных данных от кривой МЦУ, по формулам [5]:

$$S^2(\log N_f) = \frac{1}{m-1-2} \sum_{i=1}^m (\log N_{fi}^{\text{эксп}} - \log N_{fi}^{\text{расч}})^2;$$

$$S(\log N_f) = [S^2(\log N_f)]^{0,5}, \quad (4)$$

где m – объём выборки экспериментальных данных; $N_{fi}^{\text{эксп}}$ – экспериментальное число циклов до разрушения для i -го образца; $N_{fi}^{\text{расч}}$ – расчётное число циклов до разрушения по уравнению (2) или (2.1) для i -го образца.

Знаменатель дроби перед знаком суммы $(m-1-2) = (m-3) = (m-1-d)$, где d – число значимых коэффициентов уравнения регрессии [6].

Для кривой МЦУ (регрессия по уравнению (2) или (3)) были построены верхняя и нижняя границы доверительного интервала с доверительной вероятностью $\beta = 0,99$ (уровень значимости $q = 0,995$). Значения верхней и нижней границы доверительного интервала определялись по формулам [5]:

$$\begin{aligned} [\log N_f(\Delta\sigma_N)]^{\text{max}} &= [\log N_f(\Delta\sigma_N)]^{\text{средн}} + \\ &+ [t_{q,v} \times S(\log N_f)/m^{1/2}]; \\ [\log N_f(\Delta\sigma_N)]^{\text{min}} &= [\log N_f(\Delta\sigma_N)]^{\text{средн}} - \\ &- [t_{q,v} \times S(\log N_f)/m^{1/2}], \end{aligned} \quad (5)$$

где значения $[\log N_f(\Delta\sigma_N)]^{\text{средн}}$ определяются из уравнений (2) или (2.1); $t_{q,v}$ – квантиль t -распределения Стьюдента для числа степеней свободы $v = m-1$ и уровня значимости q определяется из [7], значение $S(\log N_f)$ определяется из соотношения (4).

Средние значения пределов МЦУ были определены по уравнению регрессии (3.1), а верхняя и нижняя границы доверительного интервала для среднего были определены с использованием уравнения (2.1) и соотношений (5).

Результаты испытаний компактных СТ-образцов были обработаны с использованием следующих процедур.

По результатам измерений удлинения трещины получены кривые изменения длины трещины в координатах « $\Delta l_i - N_i$ » для каждого компактного СТ-образца. Затем, по результатам графического дифференцирования этой кривой, для соответствующих величин l_i определялись значения $(dl/dN)_i$:

$$(dl/dN)_i = (\Delta l_i)/(\Delta N_i). \quad (6)$$

Далее, для этих величин l_i определялись значения КИН (ΔK_i) и строилась кинетическая диаграмма СРТУ в координатах « $(dl/dN) - \Delta K$ » (второй участок) в соответствии с требованиями стандартов [3, 4].

Из числа нанесённых точек отбрасывались те, которые соответствуют первому участку кинетической диаграммы развития трещины. Оставшиеся точки используются для определения параметров уравнения Пэриса для второго участка кинетической диаграммы:

$$(dl/dN) = A * (\Delta K)^n. \quad (7)$$

После логарифмирования (7) принимает вид:

$$\log(dI/dN) = \log A + n \cdot \log(\Delta K). \quad (8)$$

Значения параметров A и n уравнения (8) определяются по выборке $\{(dI/dN)_i; \Delta K_i\}$ методом наименьших квадратов.

Вся математическая обработка результатов экспериментов была проведена с использованием приложения *MS Excel*, программ *Sigma Plot* и *Grapher* в ОС *Windows XP*.

2. Анализ полученных результатов

2.1. Результаты испытаний на МЦУ

Гладкие образцы. Испытания были проведены при температурах 20 °С (11 образцов) и 650 °С (12 образцов).

Экспериментальные данные представлены на рис. 1 и использованы для определения уравнения регрессии и построения кривых МЦУ, а также для определения пределов МЦУ на базах $N_f = 5 \cdot 10^3 \dots 10^4$ циклов по уравнению регрессии.

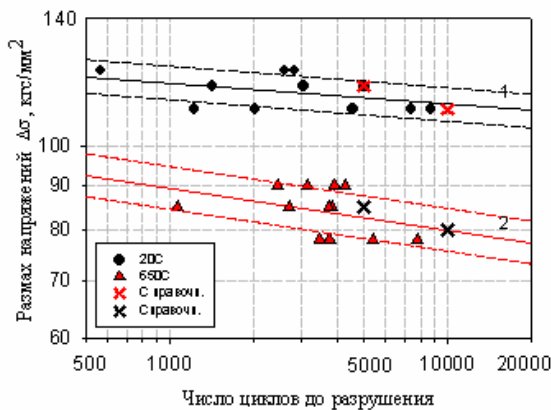


Рис. 1. МЦУ-гладкие образцы: 1 – $T = 20$ °С; 2 – $T = 650$ °С. Сплошная линия – регрессия, пунктир – верхн. и нижн. границы доверительного интервала

В табл.1 приведены численные значения коэффициентов уравнения (3.1), которые были использованы для построения кривых МЦУ (линии регрессии), показанных на рис. 1.

Для определения границ доверительного интервала средних значений использованы значения квантиля t -распределения Стьюдента [7]: для $T = 20$ °С – $t_{0,995, 10} = 3,169$, а для $T = 650$ °С – $t_{0,995, 11} = 3,106$. На рис. 1 также показаны справочные средние значения пределов МЦУ [1] на базах $N_f = 5 \cdot 10^3$ и $N_f = 10^4$ циклов. Как следует из рис. 1 справочные данные [1] находятся в пределах доверительного интервала для средних значений. Т.е. средние значения, полученные в настоящей работе, и справочные данные различаются незначительно с высокой доверительной вероятностью $\beta = 0,99$.

Таблица 1

МЦУ. $T = 20$ и 650 °С.
Значения коэффициентов уравнения (3.1),
оценок $S^2(\log N_f)$ и $S(\log N_f)$

$T_{\text{исп}},$ °С	b0	b1	$S^2(\log N_f)$	$S(\log N_f)$ (С.К.О.)
Гладкие образцы				
20	2,1457	-0,0247	0,6653	0,8157
650	2,0956	-0,0481	0,3231	0,5685
Образцы с надрезом				
20	2,1571	-0,0549	0,0586	0,2421
650	1,9644	-0,0652	0,1806	0,4250

Образцы с надрезом. Испытания были проведены при температурах 20 °С (12 образцов) и 650 °С (12 образцов). Измерения радиуса в вершине надреза в образцах до испытаний показали, что его значение на всех образцах находится в пределах $0,1 \leq r \leq 0,17$ мм. В табл. 1 приведены численные значения коэффициентов уравнения (3.1), которые были использованы для построения кривых МЦУ (линии регрессии), показанных на рис. 2. В этой табл.1 приведены значения дисперсии $S^2(\log N_f)$ и С.К.О. – $S(\log N_f)$. Для определения границ доверительного интервала средних значений (линии регрессии) использованы значения квантиля t -распределения Стьюдента [7]: для $T = 20$ °С и $T = 650$ °С – $t_{0,995, 11} = 3,106$.

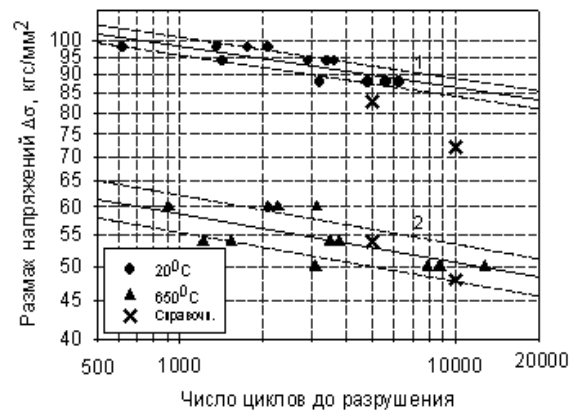


Рис. 2. МЦУ – образцы с надрезом: 1 – $T = 20$ °С; 2 – $T = 650$ °С. Сплошная линия – регрессия, пунктир – верхняя и нижняя границы доверительного интервала

Как следует из рис. 2, справочные данные [1] находятся ниже доверительного интервала для среднего при $T = 20$ °С, а для температуры $T = 650$ °С находятся внутри доверительного интервала. Необходи-

димо отметить, что справочные данные [1] были получены по результатам испытаний образцов с радиусом в вершине надреза – $\rho = 0,25$ мм. Т.е. испытанные образцы имели более высокий коэффициент концентрации напряжений [8], чем образцы, на которых были получены справочные данные [1].

2.2. Результаты испытаний на СРТУ

Испытания были проведены при температурах 20 °С (6 образцов) и 650 °С (8 образцов). На основании обработки первичных данных по методике раздела 1.3 и в соответствии с требованиями стандартов [3, 4] построены кинетические диаграммы скорости роста трещины (рис. 3).

Для определения параметров уравнения Пэриса (7) и (8) из выборки точек, представленных на рис. 3 были исключены точки (по методике раздела 1.3), соответствующие первому участку кинетической диаграммы.

Полученные значения параметров представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения параметров уравнения Пэриса (7), (8), диапазон размаха КИН и скорости СРТУ на втором участке кинетической диаграммы

T _{исп.} , °С	log A	n	Диапазон размаха КИН ΔK, кгс*мм ^{-3/2} и скорости dI/dN, мм/цикл (второй участок кинетической диаграммы)			
			ΔK _{min}	(dI/dN) _{mi} n	ΔK _{max}	(dI/dN) _{ma} x
20	-11,12	3,427	140	1,7296 × e-4	320	2,9390 × e-3
650	-8,61	2,540	110	3,7691 × e-4	270	3,6878 × e-3

Там же представлены границы диапазона значений КИН и СРТУ, для которого определены значения параметров уравнения Пэриса (7), (8). На рис. 3 нанесены линии регрессии СРТУ, рассчитанные по уравнению Пэриса с табличными значениями параметров (табл.2).

Как следует из рис. 2, экспериментальные данные и линия регрессии (2-й участок кинетической кривой роста трещины усталости) находятся в удовлетворительном соответствии.

Таким образом, уравнение Пэриса с численными значениями коэффициентов (табл.2) может быть использовано для оценки критических значений КИН (ΔK) при устойчивом росте трещины в дисках из сплава ЭИ698ВД.

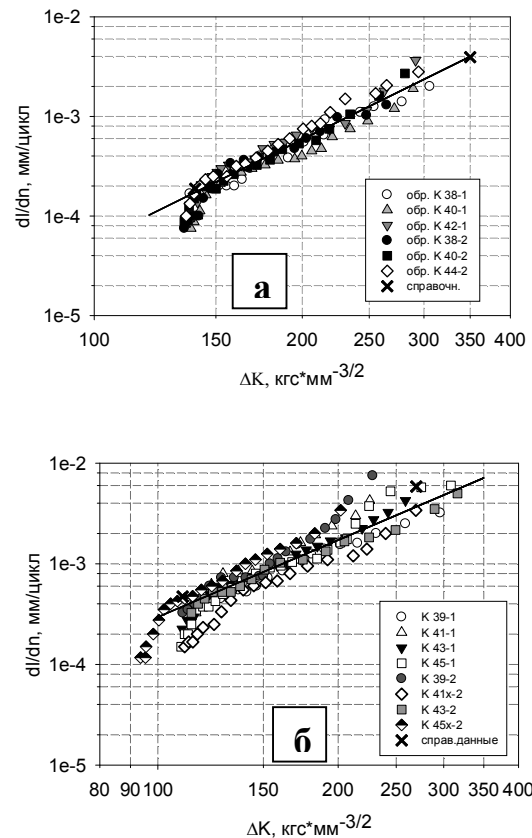


Рис. 3. СРТУ. Кинетические диаграммы скорости роста трещины усталости: а – T = 20 °С; б – T = 650 °С

Заключение

Экспериментальные данные при температурах 20 и 650 °С и результаты их обработки свидетельствуют о том, что значения МЦУ металла массивных штамповок дисков из сплава ЭИ698ВД (гладкие образцы и образцы с надрезом) производства ОАО «РУСПОЛИМЕТ» и справочные данные находятся в удовлетворительном статистическом соответствии.

Получены численные степенные модели МЦУ сплава ЭИ698ВД и значения дисперсии, которые могут быть использованы для определения расчётных значений характеристик конструкционной прочности этого сплава.

Результаты испытаний на МЦУ образцов с надрезом при температурах 20 и 650 °С показали, что даже при более высоких значениях коэффициента концентрации напряжений, т.е. при менее благоприятных условиях в сравнении со справочными данными [1], малоцикловая усталость образцов с надрезом находится на уровне или превышает значения справочных данных.

Результаты испытаний компактных СТ-образцов на СРТУ при температурах 20 и 650 °С и малоцикловом нагружении использованы для опре-

деления параметров уравнения Пэриса и построения 2-го участка кинетической диаграммы скорости роста усталостной трещины. Численное уравнение Пэриса может быть использовано для определения критических значений КИН при развитии трещины усталости в дисках из сплава ЭИ698ВД.

Литература

1. *Авиационные материалы. Справочник в 9-ти томах (6-е изд.), том 3. «Жаропрочные стали и сплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов», часть I «Деформируемые жаропрочные стали и сплавы».* – М.: ОНТИ ВИАМ, 1989. – 568 с.
2. *ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Сопротивление усталости.*

3. *ОСТ 90268-78. Металлы. Метод определения скорости роста усталостной трещины.*
4. *ОСТ 92127-90. Металлы. Метод определения скорости роста усталостной трещины при испытании с постоянной амплитудой нагрузки.*
5. *Каблов Е.Н. Жаропрочность никелевых сплавов / Е.Н. Каблов, Е.Р. Голубовский.* – М.: Машиностроение, 1998. – 464 с.
6. *Львовский Б.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Б.Н. Львовский.* – М.: Высшая школа, 1982. – 224 с.
7. *Мюллер П. Таблицы по математической статистике / П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм.* – М.: Финансы и статистика, 1982. – 278 с.
8. *Нейбер Г. Концентрация напряжений / Г. Нейбер.* – М.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1947. – 204 с.

Поступила в редакцию 17.05.2010

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.М. Локощенко, заместитель директора Института механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ (МЦВ І СРТУ) МЕТАЛУ ШТАМПУВАНЬ ДИСКІВ ІЗ СПЛАВУ ЭИ698ВД ВИРОБНИЦТВА ВАТ «РУСПОЛИМЕТ»

Є.Р. Голубовський, А.С. Волков, С.М. Волков, О.Г. Демідов, О.М. Гвоздєва, Л.О. Ларіонова

Представлено результати експериментального дослідження малоциклової втоми (МЦВ) і тріщиностійкості (СРТУ) металу масивних штампувань дисків із сплаву ЭИ698ВД при температурах 20 і 650 °С. Набуто чисельних значень коефіцієнтів статечної моделі МЦВ для гладких зразків і зразків з надрізом для кожної температури. Визначено чисельні значення параметрів рівняння Періса для другої ділянки кінетичної діаграми швидкості росту тріщини (СРТУ). Приведено розрахункові криві МЦВ і СРТУ. Показано задовільну відповідність розрахунку, експерименту і довідкових даних.

Ключові слова: нікелевий сплав, штампування диска, зразки, малоциклова втома, швидкість росту тріщини втоми.

CHARACTERISTICS OF CONSTRUCTIONAL DURABILITY (LCF AND GROWTH RATES OF A CRACK OF WEARINESS) METAL OF PUNCHINGS OF DISKS FROM ALLOY EI698VD OF MANUFACTURE OF OPEN SOCIETY «RUSPOLIMET»

E.R. Golubovskiy, A.S. Volkov, S.N. Volkov, A.G. Demidov, E.N. Gvozdeva, L.A. Larionova

Results of an experimental research LCF and growth rates of a crack of fatigue metal of massive punchings of disks from alloy EI698VD at temperatures 20 and 650°C. Numerical values of factors of sedate model LCF for smooth samples and samples with a cut for each temperature are received. Numerical values of parameters of equation Paris for the second site of the kinetic diagram of growth rate of crack are determined. Settlement curves LCF and growth rates of a crack of fatigue are resulted. Satisfactory conformity of calculation, experiment and the help data is shown.

Key words: nickel alloy, punching of a disk, samples, LCF, growth rate of a crack of fatigue.

Голубовский Евгений Ростиславович – д-р техн. наук, проф., нач. отдела конструкционной прочности сплавов ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия, e-mail: golubovskiy@ciam.ru.

Волков Андрей Станиславович – зам. главного технолога ОАО «РУСПОЛИМЕТ», Кулебаки, Нижегородская обл., Россия, e-mail: volkov@ruspolymet.ru.

Волков Станислав Николаевич – консультант ОАО «РУСПОЛИМЕТ», Кулебаки, Нижегородская обл., Россия, e-mail: volkov@ruspolymet.ru.

Демидов Александр Григорьевич – вед. конструктор, отдел конструкционной прочности сплавов ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия, e-mail: golubovskiy@ciam.ru.

Гвоздєва Елена Николаевна – вед. инженер, отдел конструкционной прочности сплавов ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия, e-mail: golubovskiy@ciam.ru.

Ларионова Людмила Александровна – вед. инженер ОАО «РУСПОЛИМЕТ», Кулебаки, Нижегородская обл., Россия, e-mail: volkov@ruspolymet.ru.