

УДК 669.14.018.44:539.4

Е.Р. ГОЛУБОВСКИЙ, М.Е. ВОЛКОВ, Н.М. ЭММАУССКИЙ*ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, Россия***ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ (СРТУ) В НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ ДЛЯ ДИСКОВ ГТД**

На основании результатов испытаний при температурах 20 °С и 400 °С компактных СТ-образцов из сплавов ЭП741НП и ЭК151ИД при циклическом нагружении определены для каждого образца параметры уравнения Пэриса, описывающего второй участок кинетической диаграммы устойчивого роста трещины усталости. Показано, что оценка значений длины начальной и конечной трещины зависит от методических особенностей измерения начальной и конечной трещины. Установлено, что параметры уравнения Пэриса (C и n) исследованных сплавов, которые определены по результатам эксперимента, связаны линейной зависимостью. Показан универсальный характер этой зависимости. Указанная зависимость использована для определения консервативной оценки средних значений параметров C и n .

Ключевые слова: испытания на СРТУ, компактный образец, трещина, скорость роста трещины усталости, параметры уравнения Пэриса.

Введение

Для дисков турбин авиационных ГТД применяются никелевые жаропрочные сплавы, в том числе сплавы ЭП741НП [1] и ЭК151ИД [2]. При использовании третьей стратегии установления ресурса дисков используется характеристика скорости развития трещины усталости (СРТУ) в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений (КИН) – скорость на втором участке кинетической диаграммы СРТУ.

Цель настоящей работы – определить значения характеристик СРТУ деформируемого сплава ЭК151ИД и гранульного сплава ЭП741НП (с размером гранул до 140 мкм) с учетом методических особенностей регистрации длины трещины в процессе испытаний и оценки средних значений параметров уравнения типа Пэриса по результатам испытаний нескольких образцов.

1. Материал, образцы и методика испытаний

Сплав ЭК151ИД – образцы изготовлены из металла шайбы (диаметром ~ 200 мм и высотой ~ 40 мм), после термообработки, производства СМК (две половинки шайбы получены из ВИАМ). Сплав ЭП741НП – образцы изготовлены из металла полностью обработанных заготовок дисков производства ВИЛС.

Компактный СТ-образец с плоским надрезом (50×52×10 мм) показан на рис. 1. Длина надреза (по чертежу) от оси приложения нагрузки до вершины надреза – $l_{\text{надр}} = 12 \pm 0.1$ мм; принятые обозначения: длина начальной

трещины $l_0 = l_{\text{надр}} + \Delta l_0$; длина трещины – $l_1 = l_0 + \Delta l_1$. Длина надреза $l_{\text{надр}}$ в каждом образце измерялась до испытаний на инструментальном микроскопе (тип QC 300 – METRONICS).



Рис. 1. Компактный СТ-образец для испытаний на СРТУ

Выращивание начальной трещины при температуре 20 °С в образцах из сплава ЭП741НП выполнялось на высокочастотных резонансных машинах AMSLER 100 (Zwick/Roel, ФРГ) с частотой $f = 91-93$ Гц, а в образцах из сплава ЭК151ИД на сервогидравлических испытательных машинах LFV-100 («Walter + bay», Швейцария) с частотой $f = 10-20$ Гц. Испытания на СРТУ всех образцов были проведены на сервогидравлических испытательных машинах LFV-100 («Walter + bay», Швейцария) с управляющим и регистрирующим пакетом программ «DION_ΔK». Рост трещины в процессе выращивания начальной трещины и в процессе испытаний образца с начальной трещиной контролировался и регистрировался с применением высокотемпературного датчика

раскрытия трещины – датчика податливости (тип EP 3548 COD) - база датчика 5 мм. Выращивание начальной трещины выполнялось при осевом нагружении, с коэффициентом асимметрии нагрузки в цикле $R = (P_{max}/P_{min}) = 0,1$. В соответствии с требованиями стандартов [3-5] на компактных СТ-образцах выращивалась начальная трещина до значений $\Delta l_0 \sim 1-2$ мм. По достижении значений Δl_0 (по датчику податливости) процедура выращивания начальной трещины прекращалась. После этого на инструментальном микроскопе (QC 300 – METRONICS) проводилось измерение длины Δl_0 с двух сторон СТ-образца (перпендикулярных плоскости фронта развития трещины) и в качестве начальной длины Δl_0 принималось среднее значение по результатам этих измерений. Это значение вводилось в пакет «DION_ΔK» до начала испытаний на СРТУ образца с начальной трещиной, задавался шаг регистрации датчиком податливости удлинения длины трещины $\Delta l_1 = 0,25$ мм в процессе испытаний и вводилось значение конечной длины трещины $l_k = 25$ мм, при котором испытание образца останавливалось. После этого выполнялся статический долом образца (если образец не был разрушен при испытании). После испытаний на СРТУ проводилось измерение на инструментальном микроскопе длины l_0 и l_k по излому образца (рис. 2) по средней линии фронта начальной трещины и длины конечной трещины, соответствующей предразрушению образца.

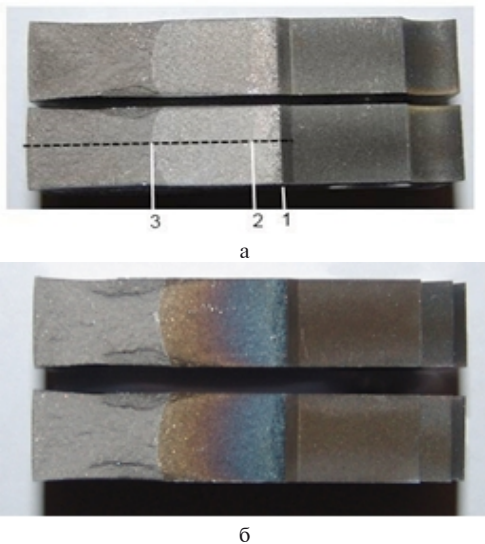


Рис.2. Изломы образцов из сплава ЭП741НП после испытаний на СРТУ при температурах 20 °С (а) и 400 °С (б) (а - начальное Δl_0 и конечное Δl_k приращение длины трещины для определения начальной $l_0 = l_{надр} + \Delta l_0$ и конечной $l_k = l_{надр} + \Delta l_k$ длины трещины вдоль пунктирной линии ($\Delta l_0 = l_{12}$ и $\Delta l_k = l_{23}$).

Значения $\Delta l_0 = l_{12}$ и $\Delta l_k = l_{23}$ определяются как средние значения по результатам измерений на изломах обеих половинок разрушенного образца.

Эти значения вводились в пакет «DION_ΔK», который выдавал итоговый результат зависимости $l_1 = F(N_i)$ в табличной форме с шагом $\Delta l_1 = 0,25$ мм. Следует отметить, что значения длины начальной трещины l_0 могут различаться при измерениях, определяемых как среднее по результатам измерения с двух сторон $(l_0)_1$ от значений $(l_0)_2$, определяемых по излому образца после испытаний (табл.1).

Таблица 1 – Значения начальной длины трещины l_0 , измеренные различными методами

Сплав	№ обр.	f, Гц	P _{max} , kN	$l_{надр}$, мм	$(l_0)_1$, мм	$(l_0)_2$, мм
ЭП741НП	2	91,5	10	12	14,31	13,95
	3	91,5	10	12	12,76	13,00
	4	92,7	10	12	14,58	14,18
	5	91,5	10	12	12,83	13,00
	11	92,5	10	12	12,30	13,09
ЭК151ИД	1	10	10	11,9	13,985	13,35
	2	20	8	11,9	15,30	12,68
	3	10	8	11,9	13,495	13,62
	4	10	10	11,9	13,146	13,44

Испытания на СРТУ всех образцов с выращенной начальной трещиной проводилось при осевом нагружении с постоянными частотой и размахом ΔP в процессе испытания каждого образца, форма цикла синусоидальная, коэффициент асимметрии цикла $R = 0,1$. Были использованы следующие частоты $f = 0,5; 1,0; 5; 20$ Гц (табл.2). Температуры испытаний 20 °С и 400 °С. Радиационный нагрев образца осуществлялся печью электросопротивления, входящей в комплект машины LFV-100.

2. Полученные результаты и их обсуждение

Режимы испытаний на СРТУ 5-ти образцов из сплава ЭП741НП и 4-х образцов из сплава ЭК151ИД приведены в табл.2. Параметры режимов (табл.2) и справочные значения характеристик E и $\sigma_{0,2}$ указанных сплавов [1,2] вводились в пакет «DION_ΔK», который управлял процессом испытаний. Затем полученные данные зависимости длины трещины от числа циклов $l_1 = F(N_i)$ корректировались с учетом разницы измерений начальной и конечной трещин (результаты по программе «DION_ΔK» и результаты по излому) в соответствии с рекомендациями стандарта [3]. В качестве примера такие скорректированные зависимости $l_1 = F(N_i)$ показаны на рис.3.

После получения уточненных зависимостей длины трещины от числа циклов переходим к построению второго участка кинетических диаграмм, который характеризует устойчивый рост усталостной трещины. При этом для определения размаха КИН - ΔK_i , при средней

длине трещины l_i , использовались соотношения, рекомендованные в стандарте [3]:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4),$$

где ΔP – размах силы, B – толщина образца, W – ширина образца, $\alpha = l/W$, l – длина трещины.

Средний размер трещины $l_i = (l_{i+1} + l_i)/2$, используется, для вычисления ΔK_i .

Таблица 2 – Режимы и результаты испытаний на СРТУ компактных СТ-образцов с начальной трещиной из сплавов ЭП741НП и ЭК151ИД

сплав	№ обр.	T, °C	f, Гц	P _{max} , кН	l_k^{**} , мм	ΔK^* , МПа $\sqrt{м}$	l_k^{***} , мм	N, цикл
ЭП741НП	2	20	0,5	12	25	100	25,0	19372
	3	400	0,5	10	25	100	25,42	29385
	4	400	0,5	10	25	100	24,95	18188
	5	400	5	10	25	100	24,54	34542
	11	400	5	10	28	100	28,24	32958
ЭК151ИД	1	20	1	10	28	85	25,37	76698
	2	20	20	8	25	100	24,95	286292
	3	400	1	8	28	95	27,81	73192
	4	20	1	10	28	95	27,4	74882

* - предельное значение ΔK в эксперименте, задается в пакете «DION_ΔK»,

** - значение задано в пакете «DION_ΔK»,

*** - измерение по излому

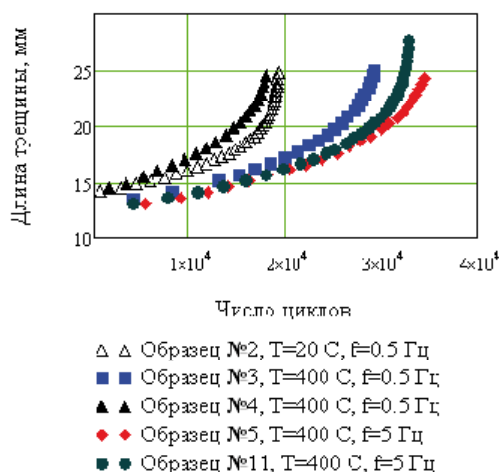


Рис. 3. Сплав ЭП741НП. Изменение длины трещины l в зависимости от числа циклов N

Для определения скорости роста трещины используется метод секущих линий. Метод подразумевает вычисление угла наклона прямой линии, соединяющей две смежные точки на кривой $l_i = F(N_i)$ (например, рис.3) по формуле:

$$(dl/dN)_i = (l_{i+1} - l_i)/(N_{i+1} - N_i), \text{ (где } i=1,2,\dots,k\text{)}. (1)$$

На рис.4, 5 и 6 показаны точками значения $\{(dl/dN)_i; \Delta K_i\}$, полученные по результатам эксперимента.

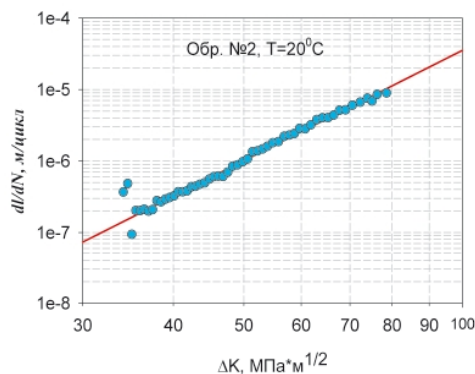


Рис. 4. Сплав ЭП741НП. T = 20 °C. Образец №2. Зависимость СРТУ от КИН

Полученные выборки пар значений $\{(dl/dN)_i; \Delta K_i\}$, представленные на рис.4, 5, 6 использованы для построения второго участка кинетических диаграмм, который характеризует устойчивый рост трещины усталости и описывается уравнением Париса:

$$dl/dN = C * \Delta K^n \quad (2)$$

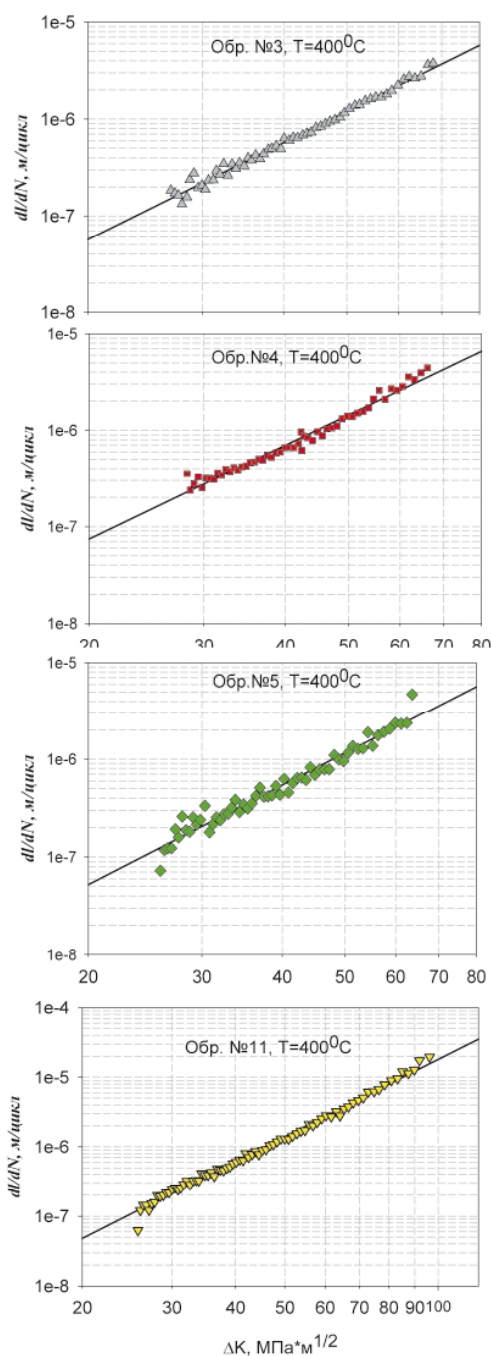


Рис. 5. Сплав ЭП741НП. T = 400 °С. Образцы №№3, 4, 5, 11. Зависимость СРТУ от КИН

В двойных логарифмических координатах « $\log(dl/dN) - \log\Delta K$ » уравнение (2) является уравнением прямой. Поэтому экспериментальные выборки $\{(dl/dN)_i; \Delta K_i\}$, показанные на рис.4,5 и 6, были использованы для определения численных значений коэффициентов уравнений линейной регрессии:

$$\log(dl/dN) = \log C + n \cdot \log(\Delta K) \quad (3)$$

Обработкой этих выборок по методу наименьших квадратов с применением программы SigmaPlot были получены для каждого образца численные значения коэффициентов $\log C$ и n уравнения регрессии (3), представленные в табл.3.

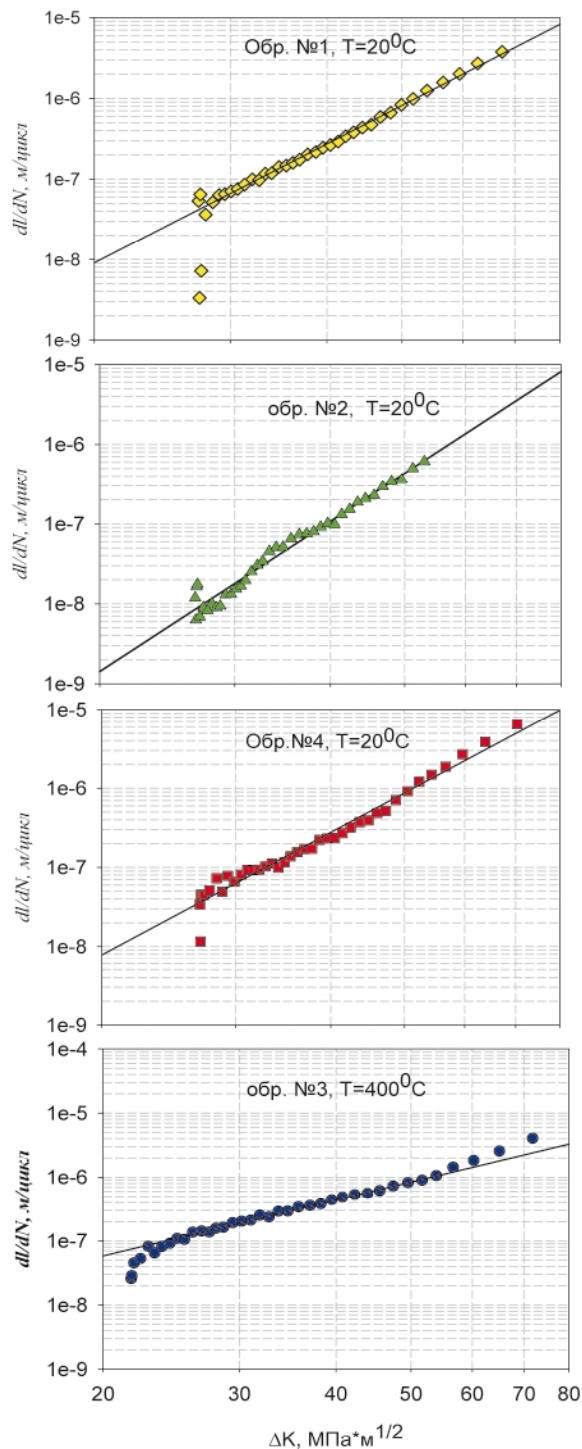


Рис. 6. Сплав ЭК151ИД. T = 20 °С — Образцы №№1, 2, 4; T = 400 °С — Образец №3. Зависимость СРТУ от КИН

В табл.3 приведены также границы интервалов (dl/dN) и (ΔK), в пределах которых были определены эти коэффициенты. Полученные значения коэффициентов (табл.3) были использованы для построения линий

регрессии (3) для каждого образца (рис.4, 5, 6), которые представляют собой вторые участки кинетической диаграммы скорости роста трещины усталости в пределах указанных выше интервалов.

Таблица 3 – Значения параметров C и n уравнения (2) и экспериментальные интервалы скоростей dl/dN и размаха КИН ΔK , в границах которых определены эти параметры

Сплав	Т, °С	№ Обр.	f, Гц	P _{max} , кН	lgC	C	n	Интервал				
								dl/dN, м/цикл		ΔK, МПа*√м		
								min	max	min	max	
ЭП741НП	400	2	0,5	12	-14,7165	1,92*10 ⁻¹⁵	5,13	1,64*10 ⁻⁷	1,03*10 ⁻⁵	35,3	79	
		3	0,5	10	-11,5762	2,69*10 ⁻¹²	3,33	1,56*10 ⁻⁷	3,03*10 ⁻⁶	27,1	65,8	
		4	0,5	10	-11,3367	4,61*10 ⁻¹²	3,235	2,17*10 ⁻⁷	1,9*10 ⁻⁶	28,0	54,3	
		5	5	10	-11,6725	2,13*10 ⁻¹²	3,375	2,00*10 ⁻⁷	2,6*10 ⁻⁶	30,0	63,6	
ЭК15ИД	400	11	5	10	-12,1075	0,78*10 ⁻¹²	3,68	1,26*10 ⁻⁷	9,6*10 ⁻⁶	25,8	85,25	
		20	1	1	10	-14,4316	4,91*10 ⁻¹⁵	3,71	4,84*10 ⁻⁸	3,8*10 ⁻⁶	27,9	67,6
			2	20	8	-16,9704	1,07*10 ⁻¹⁷	6,24	9,54*10 ⁻⁹	6,9*10 ⁻⁷	26,9	53,6
			4	1	8	-14,8052	1,57*10 ⁻¹⁵	5,15	4,13*10 ⁻⁸	5,3*10 ⁻⁶	27,8	70,0
400	3	1	10	-11,0202	9,55*10 ⁻¹²	2,91	1,05*10 ⁻⁷	1,01*10 ⁻⁶	24,4	54,15		

Для определения средних значений параметров уравнения (2) целесообразно использовать гипотезу о зависимости между собой этих параметров в виде:

$$\lg C = a + b \cdot n, \quad (4)$$

где a и b – постоянные величины.

Эта гипотеза была сформулирована и подтверждена в работе [6] на основе анализа большого количества экспериментальных значений C и n для ряда сплавов, полученных в различных лабораториях.

На рис.7 приведены все точки с координатами значений $\lg C$ и n , которые получены в настоящей работе и представлены в табл.3. Эти значения весьма удовлетворительно аппроксимируются линейной зависимостью (4) с высоким коэффициентом корреляции $r = 0,9974$. Коэффициенты a и b имеют следующие численные значения, которые получены при обработке выборки из 9-ти пар значений $\lg C$ и n (табл.3):

$$a = -5,5816; \quad b = -1,8016. \quad (5)$$

С использованием значений (5) построена линия регрессии, которая показана сплошной линией на рис.7.

Необходимо подчеркнуть, что зависимость (4) имеет, по-видимому, универсальный характер, т.к. она описывает одновременно результаты, полученные на образцах одного типа из разных сплавов, принципиально различных по технологии производства (гранульный ЭП741НП и деформируемый ЭК15ИД) и, кроме того, результаты получены при различ-

ных температурах испытания (20°С и 400°С) и различных частотах нагружения. Учитывая этот результат, можно использовать зависимость (4) с коэффициентами (5) для оценки средних значений параметров уравнения (2) по результатам испытаний нескольких образцов при одной температуре.

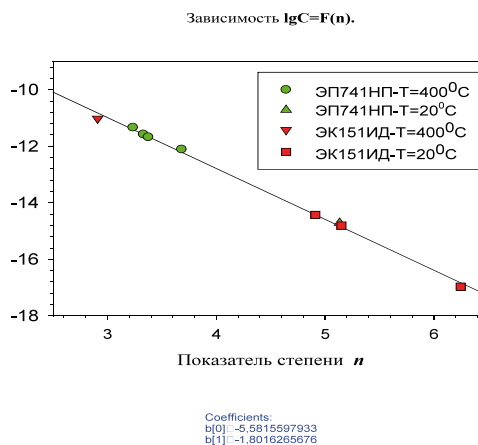


Рис. 7. Зависимость параметров уравнения (2) - $\lg C = F(n)$

При консервативной оценке средних значений параметров ($C_{\text{конс.}}$ и $n_{\text{конс.}}$) уравнения (2) по зависимости (4) с коэффициентами (5) целесообразно использовать среднюю точку интервала на линии регрессии (рис.7), ограниченного экспериментальными значениями $\lg C$ и n для данного сплава и данной температуры. На основании такой консервативной оценки имеем:

$$\begin{aligned} \text{ЭП741НП, } T=400^{\circ}\text{C} - n_{\text{конс.}}=3.4 \text{ и} \\ \lg C_{\text{конс.}}=-11,72; \quad (6) \\ \text{ЭК151ИД, } T=20^{\circ}\text{C} - n_{\text{конс.}}=5,6 \text{ и} \\ \lg C_{\text{конс.}}=-15,7. \end{aligned}$$

Зависимость (4) в графической форме также может быть опробована для отбраковки результатов испытаний, которые могут отклоняться от линии регрессии на рис.7. Однако разработка такой методики отбраковки данных является предметом будущего исследования.

Заключение

На основании результатов испытаний при температурах 20 °С и 400 °С компактных СТ-образцов из сплавов ЭП741НП и ЭК151ИД определены для каждого образца параметры уравнения Пэриса, описывающего второй участок кинетической диаграммы устойчивого роста трещины усталости.

Показано, что при оценке значений длины начальной и конечной трещины необходимо уточнять и корректировать показания датчика податливости по результатам измерения длин этих трещин в изломе образца после испытаний.

Установлено, что параметры уравнения Пэриса (С и n) исследованных сплавов, которые определены по результатам эксперимента, связаны линейной зависимостью $\lg C = a + b \cdot n$. Учитывая различную технологическую наследственность сплавов (гранульный ЭП741НП и деформируемый ЭК151ИД), различные условия нагружения (температура испытаний, частота,

уровень максимальной нагрузки – табл. 2,3) следует подчеркнуть, что эта зависимость является универсальной. Указанная зависимость использована для определения консервативной оценки средних значений параметров С и n. Интегрированием уравнения Пэриса с этими оценками может быть получено, в заданных условиях нагружения, число циклов до образования трещины заданной длины или длина трещины при заданном числе циклов.

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

Литература

1. Машиностроение (Энциклопедия). Раздел II «Материалы в машиностроении», Том II-3 «Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы», М., «Машиностроение», 2001г., 880с.
2. Жаропрочные стали и сплавы (Буклет), М., ОНТИ ВИАМ, 2012 г.
3. ASTM E-647-08 «Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates».
4. ОСТ 1 90268-78 «Металлы. Метод определения скорости роста усталостной трещины».
5. ОСТ 1 92127-90 «Металлы. Метод определения скорости роста усталостной трещины при испытании с постоянной нагрузкой».
6. Исследование характеристик циклической СРТ в материалах основных деталей авиационных ГТД [Текст] /Потапов С.Д., Перепелица Д.Д.// Вестник МАИ-2013-т.20, №1 - С.124-139.

Поступила в редакцию 10.06.2013

Є.Р. Голубовський, М.Є. Волков, Н.М. Еммауський. Оцінка швидкості розвитку тріщини втоми (ШРТВ) у нікелевих сплавах для дисків ГТД

На ґрунті результатів випробувань при температурах 20 °С і 400 °С компактних СТ-зразків зі сплавів ЭП741НП и ЭК151ИД за умов циклічного навантаження визначено для кожного зразка параметри рівняння Періса, яке описує другу частку кінетичної діаграми стійкого зростання тріщини втоми. Показано, що оцінка значень довжини початкової і кінцевої тріщини залежить від методичних особливостей вимірювання початкової і кінцевої тріщини. Встановлено, що параметри рівняння Періса (С і n) досліджених сплавів, які визначено за результатами експерименту, пов'язані лінійною залежністю. Показано універсальний характер цієї залежності. Зазначену залежність використано для визначення консервативної оцінки середніх значень параметрів С і n.

Ключові слова: випробування на ШРТВ, компактний зразок, тріщина, швидкість зростання тріщини втоми, параметри рівняння Періса

E.R.Golubovskiy, M E. Volkov, N. M. Emmausskiy. Assessment of speed of development of the crack of fatigue (SDCF) in nickel alloys for diskS GTE

On the basis of results of tests at temperatures 20 °C and 400 °C compact CT- samples from alloys EP741NP and EK151ID at cyclic loading parametres of the equation of Peris describing the second site of the kinetic chart of steady growth of a crack of fatigue are defined for each sample. It is established that parametres of the equation of Peris (C and n) the studied alloys which are determined by results of experiment, are connected by linear dependence. Universal nature of this dependence is shown. The specified dependence is used for definition of a conservative assessment of average values of parametres C and n.

Key words: tests for SDCF, compact sample, crack, growth rate of a crack of fatigue, parametres of the equation of Peris.