



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИСКОВ ГТУ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ – ПУТЬ К УВЕЛИЧЕНИЮ ИХ ПРОЕКТНОГО РЕСУРСА

В работе рассмотрены методики прогнозирования безопасного повреждения дисков компрессоров и турбин стационарных и авиационных ГТУ на стадии докритического развития трещин. Предлагаются методы оценки межосмотровых периодов, сроков и объемов проведения регламентных работ с учетом закономерностей докритического развития трещин. При этом учитываются особенности работы материалов стационарных ГТУ (пиковые, полупиковые, стационарные режимы), авиационных ГТУ (типовые полетные циклы), формы циклов нагружения, температурные режимы, формы фронта трещины и их критические размеры и т.д. На примере диска стационарной ГТУ при помощи разработанной программы показан анализ развития трещин у различных концентраторов напряжений, на основе которого можно сделать вывод о живучести диска и о наиболее вероятном месте разрушения.

Ключевые слова: трещиностойкость; диски газотурбинных двигателей; эксплуатация по техническому состоянию; живучесть; критический размер трещины

Введение

Авторы [1] рекомендует применять принцип эксплуатации АГТД по «техническому состоянию». В соответствии с этим эксплуатация двигателя происходит до появления постулируемой трещины глубиной 0,4 мм. При усталостном повреждении «назначенный ресурс» деталей ГТД предлагается определять с коэффициентом запаса 4, что на наш взгляд является не достаточно обоснованным без учета закономерностей развития трещин с учетом комплекса эксплуатационных и конструкционных факторов и с учетом этого определения возможных фактических критических длин трещины.

Необходимо отметить, что за рубежом такой подход применяется давно. Данный метод эксплуатации основан на анализе технического состояния двигателя, устанавливаемого по результатам периодического контроля. При назначении интервала контроля определяющим фактором является период безопасного развития возможных дефектов в основных деталях АГТД, к которым относятся диски компрессора и турбины разрушение которых не локализуется в корпусе и может привести к катастрофическим последствиям.

В Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины на основании совместных исследований с рядом отечественных и зарубежных предприятий были разработаны методики прогнозирования развития трещин усталости с учетом истории нагружения и совместного влияния устало-

сти и ползучести, что актуально для спектров нагруженности дисков компрессоров и газовых турбин двигателей гражданской и транспортной авиации [2-4].

Анализ разрушения роторов газовых турбин показывает, что дефекты развиваются у концентраторов вследствие усталостного развития трещин и снижения пластичности материала в результате деградации механических свойств в процессе эксплуатации.

Постановка задачи

На рис. 1 показаны фотография и указаны места и причины разрушения диска компрессора высокого давления.

Для определения периода безопасного развития трещины от минимального размера a_0 до критического $a_{кр}$ необходимо проинтегрировать уравнение Париса (1), которое используют для описания скорости роста трещин.

$$\frac{da}{dN} = C(K_{max})^m,$$

$$N = \int_{a_0}^{a_{кр}} \frac{1}{C(K_{max})^m} da, \quad (1)$$

где a_0 – начальная длина трещины, $a_{кр}$ – критический размер трещины, a – длина трещины в интервале $a_0 - a_{кр}$, N – число циклов нагружения, C , m – эмпирические коэффициенты уравнения Париса,

K_{max} – максимальный коэффициент интенсивности напряжений.

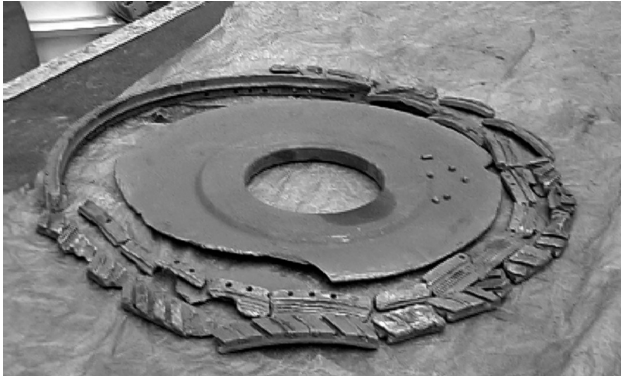


Рис. 1. Вид разрушенного диска компрессора высокого давления из мартенситной стали ЭП866-Ш. Разрушение статического характера. Изломы хрупкие. Начало разрушения – от отверстий штифтового соединения. Нарботка 13500 ч.

Однако при этом не учитывается форма цикла нагружения.

При разработке методики эксплуатации двигателей по техническому состоянию учитывались следующие факторы: температура, форма цикла нагружения, частота нагружения, история нагружения, степень двухосности нагружения, форма

фронта трещины, термообработка, размеры детали, концентрация напряжений и т.д.

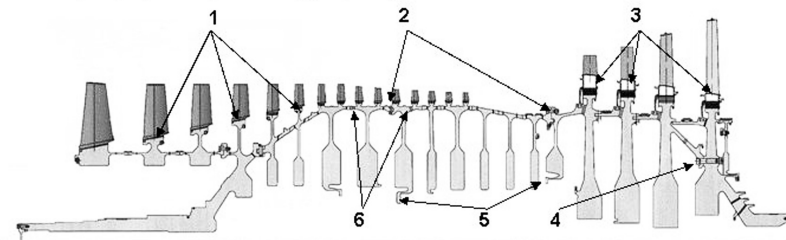
С учетом выдержек при максимальной нагрузке в цикле (трапецидальный цикл нагружения), что характерно для транспортной авиации, уравнения (1) должно содержать второе слагаемое, которое учитывает развитие трещины в результате ползучести при выдержках и после интегрирования скорости роста трещин время до разрушения в этом случае определяется как:

$$t = \frac{1}{f} \int_{a_0}^{a_{sp}} \frac{da}{A(K_{max})_f^m} + \int_{a_0}^{a_{sp}} \frac{da}{C(K_{max})_{cr}^{m_1}} \quad (2)$$

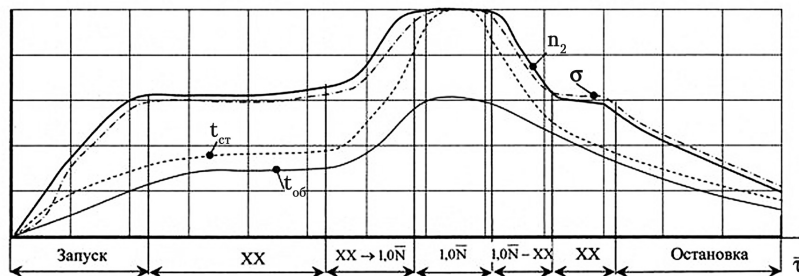
На рис. 2 показаны ротор стационарной ГТУ, места возможного зарождения трещин и характерное распределение температур и напряжений по полотну диска. Перед началом исследования характеристик трещиностойкости материалов были определены диапазоны изменения температуры, напряжений и двухосности нагружения. Некоторые результаты расчетов с наибольшими напряжениями и температурами представлены на (рис. 3).

В работе [5] приведены результаты расчета распределения по радиусу модельного диска значений температур, напряжений, степени двухосности, соответствующих номинальной мощности двигателя.

- нагрузки от центробежных сил ($\sigma_{ном} < 500$ МПа);
- длительные нагрузки при высокой температуре ($t_{max} < 450^\circ\text{C}$);
- циклические нагрузки ($f < 50$ Гц);
- выдержка в цикле (t_{h} до 1 часа)
- концентрация напряжений ($\alpha_z = 1,5 \dots 3,0$)

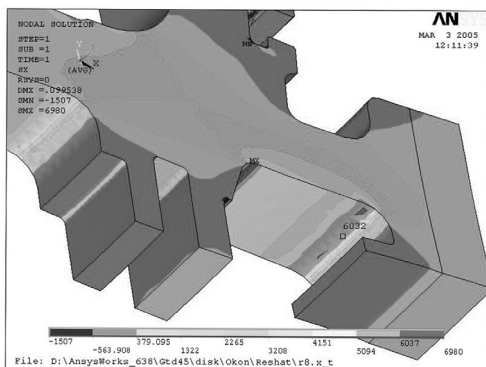


Положение типичных концентраторов напряжений в роторе:
наружные: 1 – замковые соединения компрессорных рабочих лопаток с дисками, 2 – болтовые соединения, 3 – замковые соединения турбинных рабочих лопаток с дисками; **внутренние:** 4 – болтовые и штифтовые соединения барабанных участков, 5 – крепления гибких элементов дисков, 6 – отверстия подвода охлаждающего воздуха

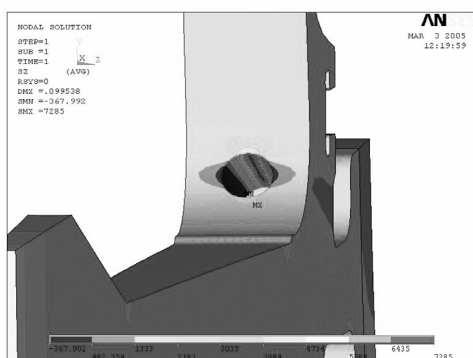


Характерное изменение температуры и напряжений в дисках турбины на нестационарных режимах (в относительных величинах)

Рис. 2. Ротор стационарной газотурбины установки.



а



б

Рис. 3. МКЭ расчет напряжений в диске стационарной ГТУ:
 а – распределение радиальных напряжений σ_1 в районе обода диска, кг/см²
 б – распределение окружных напряжений σ_2 по контуру отверстия, кг/см²

Показано что степень двухосности λ меняется от -0,2 до 1,12 по полотну диска, что и определило диапазон исследований. До настоящего времени не существует нормативных документов относительно выбора размеров и форм образцов для исследования влияния двухосного нагружения на характеристики трещиностойкости материалов. Были спроектированы и изготовлены крестообразные образцы при выборе типоразмеров руководствовались геометрическими размерами изучаемого объекта и возможностью оборудования.

Результаты экспериментальных исследований показали, что в изучаемом диапазоне изменения двухосного нагружения при $\lambda > 0$ скорость роста трещины при циклическом нагружении уменьшается примерно на 10% по сравнению с $\lambda = 0$, а при $-1 < \lambda < 0$ возрастает примерно на 30%. В работе [6] представлена модель учета влияния степени двухосности нагружения на скорость трещины.

Результаты исследований

В Институте проблем прочности имени Г. С. Писаренко исследования трещиностойкости проводились на сервогидравлической установке Гидро-

пульс 400 (Schenck) и испытательном комплексе на базе установки УЭ-50, позволяющем исследовать влияние двухосного нагружения (рис. 4).

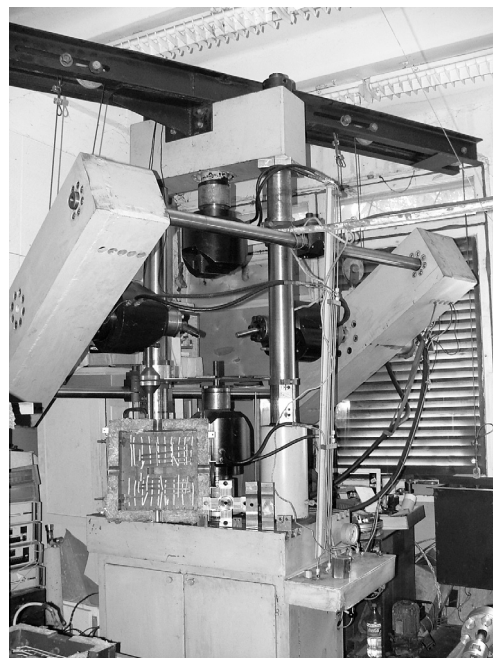


Рис. 4. Сервогидравлический испытательный комплекс

Как отмечалось ранее, долговечность дисков АГТД определяется комплексом эксплуатационных, технологических и конструктивных факторов, которые при их совместном воздействии могут в значительной степени снижать период безаварийной эксплуатации двигателя. С целью достоверной оценки живучести дисков необходимо располагать информацией о влиянии этих факторов, как в отдельности, так и при совместном воздействии на зарождение и докритический рост трещин.

Исследования характеристик трещиностойкости проводились на компактных (СТ) и плоских с центральным отверстием и боковой выточкой образцах. Исследования зарождения и развития трещин показали, что при увеличении температуры и номинальных напряжений относительная доля периода роста усталостных трещин в общей долговечности образца с трещинами уменьшается, если при этом напряжения в зоне действия концентратора напряжений не превышают предел текучести материала (табл. 1). В табл. 1 представлены также результаты испытаний образцов из сплавов ЭП742 и ЭП962.

Общий ресурс детали (образца) N_r с трещиной состоит из двух частей: доли до зарождения трещины (не обнаруживаемой существующими методами диагностики) и доли с развивающейся трещиной $N_{r.t}$. Из данных табл. 1 видно, что с уменьшением напряжения доля ресурса образца с развивающейся трещиной $N_{r.t}$ существенно возрастает, а с повы-

шением температуры снижается, что необходимо учитывать при интегрировании уравнения (1).

В табл. 2 приведены условия экспериментальных исследований скорости роста трещин в материалах авиационных газотурбинных двигателей при эксплуатационных температурах и значения коэффициентов уравнения Париса (1), которые аппроксимируют линейный участок диаграмм усталостного разрушения. Исследования и обработка результатов были выполнены в соответствии со стандартной методикой [7]. В работах [8, 9] на основе данных табл. 2 и величины циклической вязкости разрушения при эксплуатационных температурах был выполнен расчет числа циклов докритического роста трещин и определены крити-

ческие длины трещин на полотне и ступице дисков турбин двух двигателей длительного ресурса. По результатам численного интегрирования уравнения (1) было показано, что диск, изготовленный из более прочного сплава ЭП962, подвергается нагрузкам на 27-33% большим, чем диск из сплава ЭП742 и с учетом более низких характеристик трещиностойкости количество циклов докритического роста трещин, а также критические размеры трещин в нём значительно меньше (табл. 3). Это необходимо учитывать при определении сроков межремонтных осмотров с учетом недопущения возможности развития трещин, неопределённых средствами дефектоскопического контроля, до их критических размеров.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов с концентратором напряжений

Сплав	σ_n , МПа	T, К	№, цикл	a_0 , мм	№.т., цикл	$a_{кр}$, мм	№.т./№р
	500	293	21710	1,5	7825	9,3	0,36
ЭП742	400	293	47670	0,7	36478	11,7	0,76
	400	773	11235	0,9	4756	8,9	0,42
	600	293	1200	0,9	150	2,0	0,125
ЭП962	300	293	176000	0,3	86000	12,0	0,49
	300	873	36000	1,5	2600	8,0	0,072

Таблица 2

Значения коэффициентов в уравнении Париса

Сплав	T, К	f, Гц	b_0 , мм	B	m
	293	0,5	25	$6,0 \times 10^{-16}$	5,1
	293	0,5	12	$6,4 \times 10^{-13}$	3,2
ЭП742	773	0,5	25	$1,35 \times 10^{-11}$	2,65
	973	0,5	25	$1,59 \times 10^{-11}$	2,69
	973	0,5	12	$1,4 \times 10^{-11}$	2,7
	723 (пол.ц)	–	25	$3,0 \times 10^{-10}$	2,15
	293	25	25	$9,7 \times 10^{-15}$	4,66
ЭП962	873	25	25	$3,9 \times 10^{-11}$	2,41
	973	0,5	10	$1,04 \times 10^{-11}$	3,02
	1023	25	25	$7,5 \times 10^{-12}$	3,16

Таблица 3

Критические размеры и число циклов N докритического роста трещин [8, 9]

Место расположения трещины	Диск из сплава ЭП742		Диск из сплава ЭП962	
	$a_{кр}$, мм	N	$a_{кр}$, мм	N
Трещина на полотне диска	17,4	8940	3,5	3245
Трещина на ступице диска	15,8	26945	4,3	4580

Критические размеры и число циклов N докритического роста трещин [8, 9]

	T, K	800 МПа	600 МПа	400 МПа	300 МПа
Критические Значения $K_Q, MPa\ m^{1/2}$	293	1,3/3,3	5,0/9,0	40,0/38,0	100/95,0
	873	0,7/1,6	1,7/4,0	24,0/19,0	50,0/47,0
	1023	0,35/1,0	0,8/1,7	2,8/6,0	28,0/17,0
Синусоидальный цикл, $K_{fc}, MPa\ m^{1/2}$	293	0,7/1,6	1,7/4,0	24,0/19,0	50,0/47,0
	873	0,4/1,2	1,1/2,3	5,0/8,5	31,0/24,0
	1023	0,3/0,5	0,45/1,0	1,3/2,6	3,3/6,6
Трапецидальный цикл, выдержка 20 мин, $K_{fc}, MPa\ m^{1/2}$	873	0,5/1,3	1,2/2,6	8,5/11,0	36,6/30,3
	1023	0,5/1,3	1,2/2,6	8,5/11,0	8,5/11,0

На рис. 5 (а, б) представлены температурные зависимости статических и циклических характеристик трещиностойкости при различных режимах нагружения. Видно, что в некоторых случаях циклические характеристики выше как статических так и при длительном статическом нагружении. Это зависит от разных процессов у вершины трещины протекающих при различных нагрузках (треугольном цикле нагружения, трапецидальном с

выдержками (типа полетного цикла транспортного самолета) и т.д.). В одних случаях у вершины трещины преобладают процессы ползучести и вершина затупляется, концентрация уменьшается, что приводит к повышению критических КИН (рис. 5, а). При усталостном нагружении без выдержек циклические характеристики ниже чем статические (рис. 5, б) и их необходимо использовать при расчете критических длин трещин.

В таблице 4 приведены размеры критических длин трещин ($a_{кр}$) для сплава ЭП962 в зависимости от номинальных напряжений в полотно диска, температуры и двуосности нагружения. По результатам исследований видно, что с увеличением номинальных напряжений и температуры испытаний критические размеры трещин уменьшаются, а при переходе к двухосному нагружению в большинстве случаев наоборот увеличиваются. Кроме того, абсолютные значения критических размеров трещины при максимальных номинальных напряжениях совпадает с постулируемыми значениями трещин, приведенными в [1], т.е. 0,4 мм.

На рис. 6 (а, б) показан рост трещины при длительном статическом нагружении (ДСН), данные которого могут быть использованы при прогнозировании длительности развития трещин при трапецидальной форме цикла нагружения с выдержкой t_h при максимальной нагрузке цикла:

$$\frac{da}{dN} = A(K_{max})^n + B(K_{max})^{2p} \cdot t_T^{(1-p)} + D(C^*)(t_h - t_T), \quad (3)$$

где A, n, B, p, D – коэффициенты определяемые из результатов экспериментов; C^* – С-интеграл; t_T – время перехода от маломасштабной к установившейся ползучести, указывающее какой из параметров K или C^* контролирует процесс накопления повреждений, и определяемое по формуле:

$$t_T = \frac{K_1^2(1-\nu^2)}{E(n+1)C^*}. \quad (4)$$

Если время выдержки t_h меньше времени перехода t_T , то третье слагаемое в (2) отсутствует и можно воспользоваться простым линейным сумми-

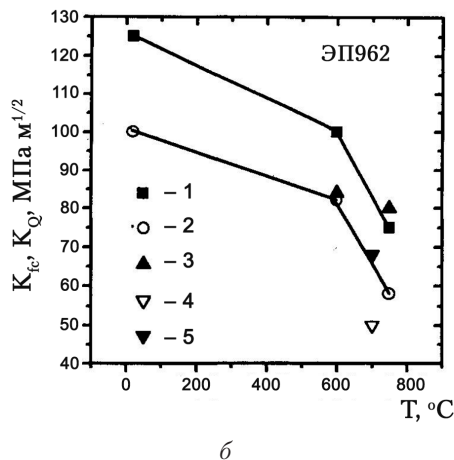
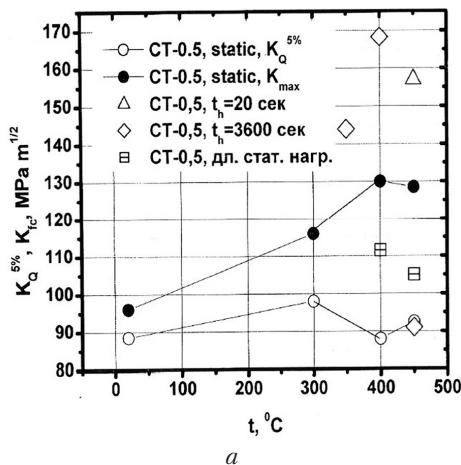
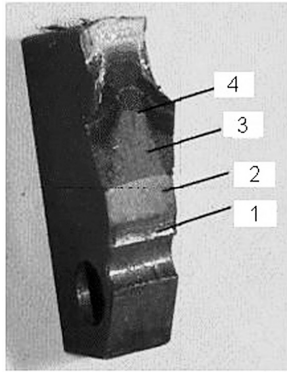
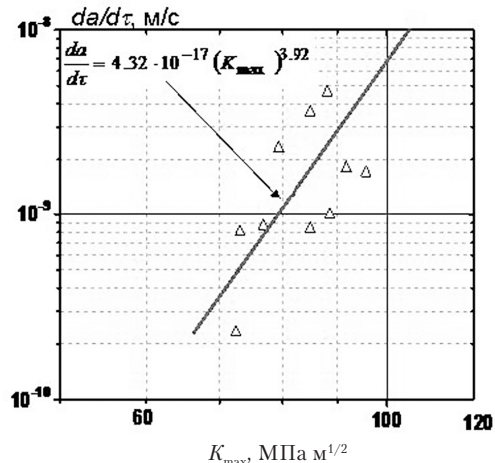


Рис. 5. Зависимость K_Q, K_{fc} от температуры для материала ЭП962: 1 – K_Q , 2 – K_{fc} , 3 – K_{fc} при выдержке $t_h = 20$ сек, 4 – K_{fc} при выдержке $t_h = 3600$ сек, 5 – K_{fc} при выдержке $t_h = 300$ сек. а – сплав ЭП517Ш, б – ЭП962



Излом образца СТ-0.5, испытанного при 450 °С: 1 – надрез; 2 – начальная трещина; 3 – трещина ползучести; 4 – фронт трещин в момент разрушения

а



Зависимость $da/dt - K_{max}$ при длительном статистическом нагружении

б

Рис. 6. Развитие трещина в СТ-0.5 образце при длительном статическом нагружении

рованием скоростей роста трещины от усталости и ползучести.

Для подтверждения применяемых подходов были проведены экспериментальные исследования скорости роста трещин ползучести в сплаве ЭП517Ш в зависимости от формы цикла нагружения. Анализируя результаты исследований приве-

денных в табл. 5 можно сделать вывод, что температура 3500 °С (и даже 4000 °С) не является температурой активации накопления деформаций ползучести. И только при температуре 4500 °С приводит к увеличению скорости накопления деформаций ползучести и следовательно к увеличению скорости роста трещин.

Таблица 5

Матрица результатов зависимостей скорости роста трещин ползучести в материале диска ЭП 517Ш от формы цикла нагружения уровня номинальных напряжений и температуры эксплуатации

Температура t °С	Режимы нагружения						
	При циклическом				При длительном статическом нагружении (ДСН)		
	Выдержка при K_{max} в сек.	$K_{нач}$, МПа $\sqrt{м}$	$K_{раз}$, МПа $\sqrt{м}$	Время до разрушения, час	$K_{нач}$, МПа $\sqrt{м}$	$K_{раз}$, МПа $\sqrt{м}$	Время до разрушения, час
350	20	3000 °С			82	–	9984*
		50			83	–	18220*
360	360	58	–	9816*			
		68	144	3300			
400	20	71	137	–	58	–	12160*
					69	96	9546
	3600	49	–	9984*	82	117	3552
450	20	31	157	116	46	–	8760*
					54	94	2976
	3600	49	90,9	7392	68	100	456
		59	91	1128	77	99,5	576
					77	115	312
				77	119	480	

* – образец не разрушился, отстояв под нагрузкой (в часах).

Так на рис. 7 показан пример расчета долговечности по времени до разрушения диска стационарной ГТУ из сплава ЭП517Ш. При этом интегрировалось уравнение скорости роста трещин с учетом линейного суммирования усталости и ползучести по времени

$$\left(\frac{da}{d\tau}\right)_{CF} = \left(\frac{da}{d\tau}\right)_C + \left(\frac{da}{d\tau}\right)_F. \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (5) по a дает нужное уравнение линейной модели расчета периода развития трещины $\tau(a_{кр})$ от начального a_0 до критического размера $a_{кр}$ при комбинированном воздействии циклических и статических нагрузок

$$\tau(a_{кр}) = \int_{a_0}^{a_{кр}} \frac{da}{\sum_1^p \left(\frac{da}{d\tau}\right)_{Ci} \cdot \tau_i + \sum_1^q \left(\frac{da}{dN}\right)_{Fj} \cdot N_j},$$

где τ_i продолжительность выдержки на i -ом режиме нагружения соответствующего спектра нагружений p типа при статическом нагружении; N_j – число циклов на j -ом уровне нагружения соответствующего спектра нагружений q типа при циклическом нагружении;

$\left(\frac{da}{d\tau}\right) = C(K_{max})^m$ – уравнение скорости роста трещины при длительном статическом нагружении, в котором C и m – параметры которые соответствуют скорости роста при температуре t и максимальной нагрузке в цикле K_{max} ;

$\left(\frac{da}{dN}\right) = A(K_{max})^n$ – уравнение скорости роста усталостных трещин, в котором A и n – параметры уравнения Париса.

Используя разработанную модель долговечности (6) путем численного интегрирования выполнен расчет долговечности диска турбины ГТД45-60, которая имеет трещину на ободе с начальной длиной $a_0 = 0.2$ мм, которая соответствует разрешенной способности капиллярных методов дефектации и условиям применения линейной механики разрушения.

Выводы

Разработана методика расчета периода развития трещин до критических размеров в дисках из стали ЭП517-Ш, которые эксплуатируются при комбинированном (длительном статическом, циклическом и циклическом с выдержками) нагружениях для характерного в диапазоне действующих в дисках температур и напряжений. Проверка адекватности предложенной модели расчета долговечности подтверждается удовлетворительным соответствием результатов расчета долговечности диска

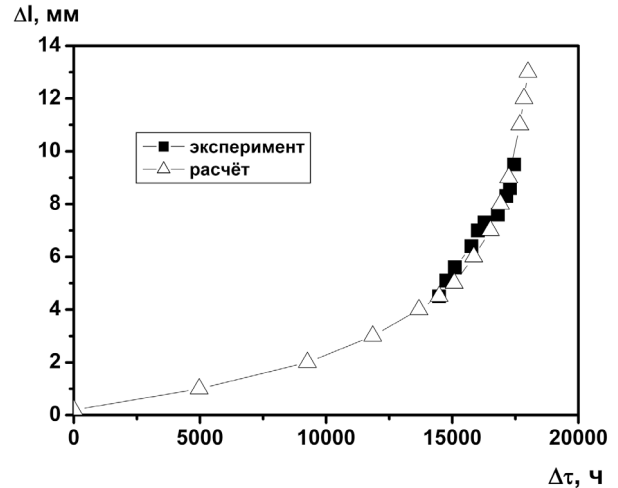


Рис. 7. Результаты прогнозирования долговечности диска с трещиной: ■ – эксперимент, △ – расчет

турбины ГТД45-60 с результатами эксперимента, полученным на образцах.

Литература

- Бауер В.О. Современные подходы к подтверждению прочностной надежности при сертификации авиационных газотурбинных двигателей /В.О. Бауер, В.К. Куевда, Г.В. Мельникова, Ю.А. Ножницкий, Б.Ф. Шорр // Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций. – Тезисы докладов. Киев, 2005. – Т. 1. – 238 с.
- Покровский В.В., К оценке ресурса дисков АГТД на стадии развития усталостных трещин. Сообщение 2. / В.В. Покровский, В.Т. Троцено, В.И. Цейтлин, В.Н. Ежов, В.С. Замотаев, В.Г. Сидяченко, В.В. Самулев // Пробл. прочности. – 1994. – № 12. – с. 3–15.
- Покровский В.В. Прогнозирование температурной зависимости вязкости разрушения жаропрочной стали 12Cr-2Ni-Mo с учетом эффекта масштаба / В.В. Покровский, С.Б. Кулишов, В.Г. Сидяченко, В.Н. Ежов, В.С. Замотаев // Научно-технический конгресс по двигателестроению НТКД-2010. – Сборник тезисов. Москва, 2010 – с. 170.
- Покровский В.В. Влияние режимов эксплуатации и конструкционных факторов на развитие трещины в стали 12Cr-2Ni-Mo /В.В. Покровский, В.Н. Ежов, С.Б. Кулишов, В.Г.Сидяченко, В.С. Замотаев // Пробл. прочности. – 2009. – № 3. – С. 66-77.
- Покровский В.В. Результаты исследования характеристик трещиностойкости стали 12Cr-2Ni-Mo / В.В. Покровский, В.Н. Ежов, В.Г. Сидяченко, Садовой Ю.С., Куликов С.Б. // Пробл. прочности. – 2012. – № 1. – С.82-88.
- Покровский В.В. Влияние двухосного нагружения на характеристики трещиностойкости стали 12Cr-2Ni-Mo / В.В. Покровский, В.Н.Ежов, В.Г.Сидяченко // Пробл. прочности. – 2013. – № 3. – С.97-104.

- [7] Методические указания. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении // РД 50-345-82. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.
- [8] Степаненко С. М. К вопросу о прочности дисков ГТД с учетом стадии развития усталостных трещин / С.М. Степаненко // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». Харьков, 1997. – С. 537-539.
- [9] Степаненко С. М. Оценка прочности дисков газотурбинных двигателей с учётом сопротивления развитию трещин / С. М. Степаненко // Тезисы докл. XXVII Международное научно-техническое совещание по проблемам прочности двигателей.– М.: МАМИ. – 1999. – 64 с.

Pokrovskii V.V., Sydiachenko V.G., Ezhov V.N., Bialonovich A.V.
G.S. Pisarenko Institute for problems of strength NASU. Ukraine, Kyiv

SCIENTIFIC AND TECHNICAL PRINCIPLES OF OPERATION DRIVES THE GAS TURBINE ACCORDING TO THE TECHNICAL STATE – THE WAY TO INCREASE THEIR PROJECT RESOURCE

The paper discusses methods of forecasting secure damaged drive compressors and turbines stationary and aircraft gas turbine plants at the stage subcritical development of cracks. The methods of assessment inter examination periods of time and volume of routine maintenance taking into account the laws subcritical development of cracks. This takes into account the peculiarities of materials is stationary gas turbines (peak, half, stationary modes), aviation GTU (typical flight cycles), the form of cycles of loading, temperature, shape of the crack front and their critical dimensions, etc. For example, the disk stationary gas turbine plants using the developed program shows the analysis of the development of cracks at different stress concentrators on the basis of which the conclusion can be made about the survivability of the disk and about the most likely place of destruction.

Keywords: fracture toughness; the disks of gas turbine engines; on-condition maintenance; survivability; critical crack size

References

- [1] Bauer V.O. Sovremenyie podhody k podtverzhdeniu prochnostnoi nadezhnosti pri sertifikacii aviacionnyh gazoturbinnyh dvigateley / V.O. Bauer, V.K. Kuevda, G.V. Melnikova, Yu.A. Nozhnickiy, B.F. Shor // Dinamika, prochnost i resurs mashin i konstrukcii // Tezisy dokladov. Kiev, 2005. – V 1. – 285 s. (in Russian)
- [2] Pokrovskii V.V. Estimating working life for aircraft gas turbine engine disks at the stage of fatigue crack development. Part 2 / V. V. Pokrovskii, V. T. Troshchenko, V. I. Tseitlin, V. N. Ezhov, V. S. Zamotaev, V. G. Sidiyachenko, V. V. Samuleev // Strength of Materials. – 1994. – V. 26, №12. – p 861-871.
- [3] Pokrovskii V.V. Prognozirovanie temperaturnoi zavisimosti vyazkosti razrusheniya zharoprochnoi stali 12Cr-2Ni-Mo s uchetom efekta mashtaba / V.V. Pokrovskii, V. N. Ezhov, S.B. Kulishov, V.G. Sydiachenko, V.S. Zamotaev // Nauchno-tehnicheskiiy congress po dvigatelestroeniu. NTKD-2010. – Sbornik tezisov. Moskva, 2010. – s.170. (in Russian)
- [4] Pokrovskii V.V. Influence of the modes of operation and structural factors on the crack propagation in 12Cr-2Ni-Mo steel / V.V. Pokrovskii, V. N. Ezhov, S.B. Kulishov, V.G. Sidiyachenko, V.S. Zamotaev // Strength of Materials. – 2009. – V. 41, №3. – p 285-293.
- [5] Pokrovskii V.V. Crack resistance characteristics study results for 12Cr-2Ni-Mo steel / V.V. Pokrovskii, V. N. Ezhov, V.G. Sidiyachenko, Yu.S. Sadovoi, S.B. Kukishov // Strength of Materials. – 2012. – V. 44, №1. – p 59-63.
- [6] Pokrovskii V.V. Effect of Biaxial Loading on the Crack Resistance Characteristics of 12Cr-2Ni-Mo Steel / V.V. Pokrovskii, V. N. Ezhov, V.G. Sidiyachenko // Strength of Materials. – 2013. – V. 45, № 3. – p. 324-328.
- [7] Metodicheskie ukazaniya. Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Opredelenie harakteristik trschinostoičnosti (vyazkosti razrusheniya) pri ciklicheskom nagruzhenii // RD 50-345-82. – М.: Izd-vo standartov, 1983. – 96 s. (in Russian)
- [8] Stepanenko S.M. K voprosu o prochnosti diskov GTD s uchetom stadii razvitiya ustalostnyh treschin / S.M. Stepanenko // Tr. Mezhdunar. Nauch.-tech. Conf. “Sovershenstvovanie turboustanovok metodami matematicheskogo i phisicheskogo modelirovaniya”. – Kharkov, 1997. – s. 537-539. (in Russian)
- [9] Stepanenko S.M. Ocenka prochnosti diskov gasoturbinnyh dvigatelei s uchetom soprotivleniya razvitiyu trschin / S.M. Stepanenko // Tezisy dokl. XXVII Mezhdunaridnoe Nauch.-tech soveshanie po problemam prochnosti dvigatelei. – М.: МАМИ. – 1999. – 64 s. (in Russian)