

## Основы эксплуатации дисков ГТД по техническому состоянию – путь к увеличению их проектного ресурса

В. В. Покровский<sup>а</sup>, В. Г. Сидяченко<sup>а</sup>, В. Н. Ежов<sup>а</sup>, С. Б. Кулишов<sup>б</sup>, А. Н. Скрицкий<sup>б</sup>,  
А. В. Бялонович<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> ГП НПКГ “Зоря”–“Машпроект”, Николаев, Украина

*Рассмотрены методики прогнозирования безопасного повреждения дисков компрессоров и турбин стационарных и авиационных газотурбинных двигателей на стадии докритического развития трещин. Предложены методы оценки межосмотровых периодов, объемов проведения регламентных работ с учетом закономерностей развития трещин. При этом принимаются во внимание особенности работы материалов для стационарных (пиковые, полупиковые, стационарные режимы) и авиационных (типовые полетные циклы) газотурбинных двигателей. С помощью разработанной программы на примере диска стационарной газотурбинной установки проанализировано развитие трещин около различных концентраторов напряжений, что позволяет прогнозировать живучесть диска и наиболее вероятное место его разрушения.*

**Ключевые слова:** трещиностойкость, диски газотурбинных двигателей, эксплуатация по техническому состоянию, живучесть, критический размер трещины.

**Введение.** Разработка новых и эксплуатация имеющихся газотурбинных двигателей (ГТД) неразрывно связаны с повышением рабочих параметров элементов конструкций. При этом обеспечение безопасности, повышение надежности и увеличение ресурса – одни из основных требований, предъявляемых к элементам конструкции.

Наиболее ответственными и нагруженными элементами являются диски компрессора и турбин ГТД, разрушение которых не локализуется внутри двигателя, что может привести к катастрофическим последствиям.

Опыт показывает, что несмотря на все многообразие средств, применяемых при проектировании, изготовлении и доводке двигателей, при эксплуатации наблюдаются разрушение и отказы в их работе, причем до 70% имеют усталостный характер [1].

Чтобы исключить внезапное разрушение дисков, можно воспользоваться концепцией эксплуатации элементов ГТД по техническому состоянию. Это позволит увеличить первичный назначенный проектный ресурс до исчерпания технического ресурса, по достижении которого возможно появление трещин. Необходимо отметить, что за рубежом такой подход применяется давно. Подробно развитие этого вопроса проанализировано в [2].

В настоящей работе предложены методики прогнозирования безопасного повреждения дисков компрессоров и турбин ГТД на стадии докритического развития трещины с целью обеспечения продления ресурса двигателя с сохранением уровней безопасности и рентабельности при эксплуатации.

Во время эксплуатации материал дисков подвергается воздействию целого ряда неблагоприятных факторов, существенно уменьшающих их прочностные характеристики: высокая температура; нестационарность нагружения; наличие концентраторов; коррозионное и эрозионное разрушение и др. Однако наиболее неблагоприятными для материала дисков являются переходные режимы, возникающие при маневрировании, пуске и остановке двигателя.

Согласно нормативному документу, разработанному специалистами ЦИАМ им. П. И. Баранова, рекомендуется следовать принципу эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) по техническому состоянию [3]. В соответствии с этим документом руководствуются принципом “безопасной долговечности” до появления постулируемой трещины глубиной 0,4 мм. При усталостном повреждении “назначенный ресурс” деталей ГТД предлагается определять с коэффициентом запаса, равным четырем, что недостаточно обосновано без учета закономерностей развития трещин и поэтому нельзя достоверно найти критическую длину трещин.

**Постановка задачи.** На рис. 1 показан разрушенный диск компрессора высокого давления.

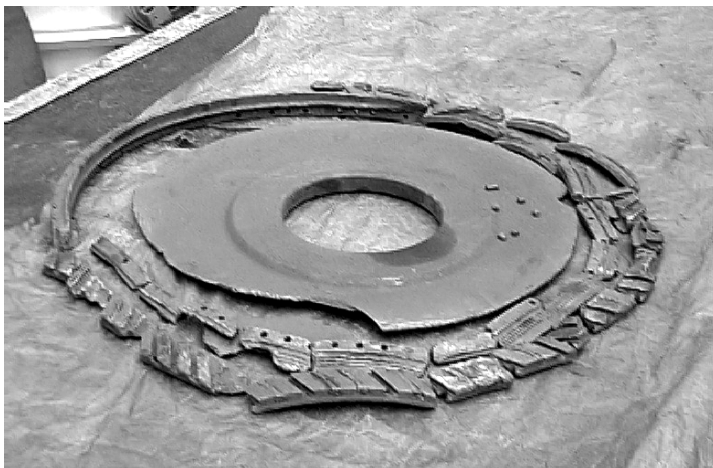


Рис. 1. Разрушенный диск компрессора высокого давления из мартенситной стали ЭП866-Ш.

Как видно, разрушение носит статический характер и начинается от отверстий штифтового соединения. Изломы хрупкие при наработке 13500 ч [4].

Для определения периода безопасного развития трещины от начального  $a_0$  до критического  $a_{кр}$  размера необходимо проинтегрировать уравнение Париса для описания скорости роста трещин при циклическом нагружении:

$$\frac{da}{dN} = C(K_{\max})^m; \quad (1)$$

$$t = \frac{1}{f} N = \frac{1}{f} \int_{a_0}^{a_{кр}} \frac{1}{C(K_{\max})^m} da, \quad (2)$$

где  $a_0$  – начальная длина трещины;  $a_{кр}$  – критическая длина трещины;  $a$  – текущая длина трещины в интервале  $a_0 \dots a_{кр}$ ;  $N$  – число циклов нагружения;  $C$ ,  $m$  – эмпирические коэффициенты уравнения Париса;  $K_{\max}$  – максимальный коэффициент интенсивности напряжений;  $f$  – частота нагружения;  $t$  – период безопасного развития трещины.

Следует заметить, что при этом не учитывается форма цикла нагружения.

При разработке методики эксплуатации двигателей по техническому состоянию учитывались следующие факторы: влияние температуры; форма цикла нагружения; частота и история нагружения; степень двухосного ( $\lambda$ ) нагружения; форма фронта трещины; размер детали; концентрация напряжений и т.д.

Принимая во внимание выдержки при максимальной нагрузке в цикле (трапецеидальная форма цикла нагружения), что характерно для транспортной авиации, уравнение (2) должно содержать второе слагаемое, которое учитывает развитие трещины вследствие ползучести при выдержках, и после интегрирования скорости роста трещин период безопасного разрушения определяется как

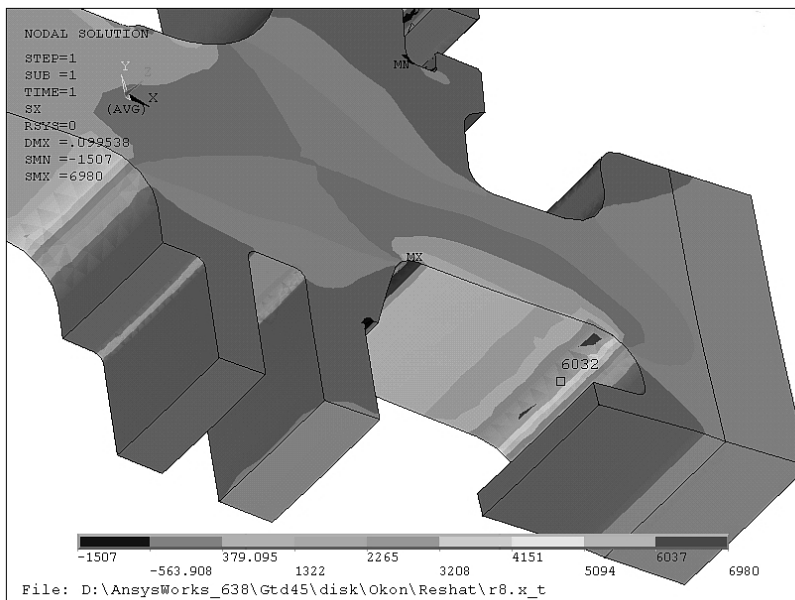
$$t = \frac{1}{f} \int_{a_0}^{a_{кр}} \frac{da}{C(K_{max})_f^m} + \int_{a_0}^{a_{кр}} \frac{da}{A(K_{max})_{creep}^{m_1}}. \quad (3)$$

Перед началом исследования характеристик трещиностойкости материалов были определены диапазоны изменения температуры, напряжений, времени выдержки и степени двухосного нагружения.

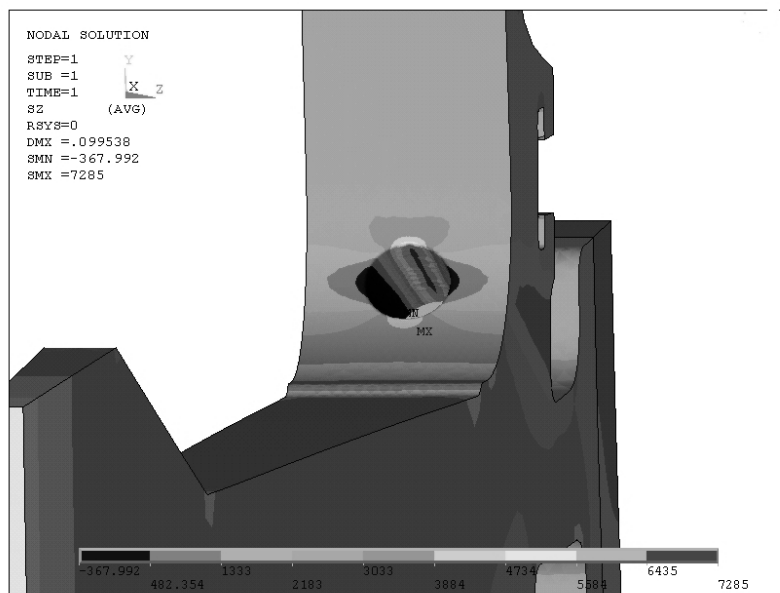
Ранее [5] приведены результаты расчетов распределения значений температур, напряжений, степени двухосного нагружения, соответствующих номинальной мощности двигателя, с использованием механических свойств сплава ЭП517-Ш. Показано, что значение  $\lambda$  изменяется от  $-0,2$  до  $1,12$  по полотну диска, что и определило диапазон изменения указанных параметров. 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 которых учитывали геометрические размеры изучаемого объекта и возможности оборудования.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что в исследуемом диапазоне изменения степени двухосного нагружения ( $\lambda > 0$ ) 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 двухосного нагружения на скорость роста трещины.

Некоторые результаты расчета распределения наибольших напряжений и температуры приведены на рис. 2.



a



б

Рис. 2. Расчет распределения напряжений в диске стационарной газотурбинной установки методом конечных элементов: а – радиальные напряжения  $\sigma_1$  в области обода диска (МПа) при  $T = 360^\circ\text{C}$ ; б – окружные напряжения  $\sigma_2$  по контуру отверстия (МПа) при  $T = 348^\circ\text{C}$ .

**Результаты исследований и их обсуждение.** Как отмечалось выше, долговечность дисков АГТД определяется комплексом эксплуатационных, технологических и конструкционных факторов, которые при совместном воздействии могут значительно снижать период безаварийной эксплуатации двигателя. С целью достоверной оценки живучести дисков необходимо располагать информацией как об отдельном, так и совместном влиянии этих факторов на зарождение и докритический рост трещин.

При исследовании характеристик трещиностойкости использовали компактные (СТ) и плоские с центральным отверстием и боковой выточкой образцы. Исследования зарождения и развития трещин показывают, что при увеличении температуры и номинальных напряжений относительная доля периода роста усталостных трещин в общей долговечности образца с трещинами уменьшается, если напряжения в зоне действия концентратора напряжений не превышают предела текучести материала (табл. 1). В табл. 1 представлены результаты испытаний образцов из сплавов ЭП742 и ЭП962.

Общий ресурс детали (образца) с трещиной  $N_p$  составляют доля до зарождения трещины (не обнаруживаемой существующими методами диагностики) и доля с развивающейся трещиной  $N_{p,т}$ . Из данных табл. 1 видно, что с уменьшением напряжения доля ресурса образца с развивающейся трещиной  $N_{p,т}$  существенно возрастает, а с повышением температуры снижается, что необходимо учитывать при интегрировании уравнения (1).

Ранее [7] в табл. 2 указаны условия проведения экспериментальных исследований скорости роста трещин в материалах АГТД при эксплуатационных температурах и значения коэффициентов уравнения Париса (1), которые аппроксимируют линейный участок диаграмм усталостного разрушения. Исследования и обработка результатов выполнены в соответствии со стандартной методикой [8]. В работах [9, 10] на основе данных табл. 2 [7] и значений циклической вязкости разрушения при

Т а б л и ц а 1

**Результаты испытаний образцов с концентратором напряжений**

Сплав	$\sigma$ , МПа	$T$ , °С	$N_p$ , цикл	$a_0$ , мм	$N_{p.t}$ , цикл	$a_{кр}$ , мм	$N_{p.t}/N_p$
ЭП742	500	20	21710	1,5	7825	9,3	0,360
	400	20	47670	0,7	36478	11,7	0,760
	400	500	11235	0,9	4756	8,9	0,420
ЭП962	600	20	1200	0,9	150	2,0	0,125
	300	20	176000	0,3	86000	12,0	0,490
	300	600	36000	1,5	2600	8,0	0,072

Т а б л и ц а 2

**Критические размеры и число циклов  $N$  докритического роста трещин [9, 10]**

Сплав	$a_{кр}$ , мм	$N$ , цикл
ЭП742	$\frac{17,4}{15,8}$	$\frac{8940}{26945}$
	$\frac{3,5}{4,3}$	$\frac{3245}{4580}$

**Примечание.** Над чертой приведены данные в случае местоположения трещины на полотне диска, под чертой – на ступице.

эксплуатационных температурах рассчитаны число циклов докритического роста трещин и критическая длина трещины на полотне и ступице дисков турбин двух двигателей длительного ресурса. Результаты численного интегрирования уравнения (1) показывают, что диск из более прочного сплава ЭП962 подвергается нагрузкам на 27...33% большим, чем диск из сплава ЭП742, и с учетом более низких характеристик трещиностойкости число циклов докритического роста трещин, а также их критические размеры значительно меньше (табл. 2). Это необходимо принимать во внимание при определении сроков межремонтных осмотров, чтобы не допустить развития трещин, которые нельзя определить средствами дефектоскопического контроля, до их критических размеров.

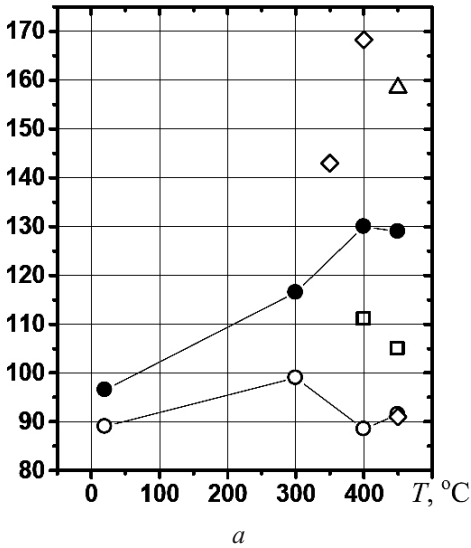
На рис. 3 представлены температурные зависимости вязкости разрушения при статическом и циклическом режимах нагружения. Видно, что в некоторых случаях циклические характеристики выше как при статическом, так и длительном статическом нагружении. Это зависит от того, какая форма цикла нагружения (треугольная или трапецеидальная с выдержкой – тип полетного цикла транспортного самолета – и т.д.) имеет место у вершины трещины при различных нагрузках. Так, для сплава ЭП517-Ш при циклическом нагружении с выдержкой  $t_h = 20$  с при высоких температурах (450°С) происходит затупление вершины трещины, и, следовательно, концентрация напряжений уменьшается, что приводит к повышению критических коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) – рис. 3,а. Однако при выдержке 3600 с кроме процессов накопления повреждений в вершине трещины имеют место процессы деформации ползучести, что обуславливает уменьшение вязкости разрушения. Аналогичное влияние времени выдержки в цикле нагружения наблюдается также для сплава ЭП962 при температуре 700°С (рис. 3,б). При усталостном нагружении без выдержек циклические характеристики ниже, чем статические (рис. 3,б), и их необходимо использовать при расчете критической длины трещин.

Т а б л и ц а 3

**Критические размеры трещины  $a_{кр}$  (мм) для сплава ЭП962 при одноосном (двухосном) нагружении**

Критические значения КИН	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{ном}, \text{МПа}$			
		800	600	400	300
$K_Q^{5\%}$	20	1,3 (3,3)	5,0 (9,0)	40,0 (38,0)	100,0 (95,0)
	600	0,7 (1,6)	1,7 (4,0)	24,0 (19,0)	50,0 (47,0)
	750	0,35 (1,0)	0,8 (1,7)	2,8 (6,0)	28,0 (17,0)
Синусоидальная форма цикла, $K_{fc}$	20	0,7 (1,6)	1,7 (4,0)	24,0 (19,0)	50,0 (47,0)
	600	0,4 (1,2)	1,1 (2,3)	5,0 (8,5)	31,0 (24,0)
	750	0,3 (0,5)	0,45 (1,0)	1,3 (2,6)	3,3 (6,6)
Трапецидальная форма цикла, выдержка 20 мин, $K_{fc}$	600	0,5 (1,3)	1,2 (2,6)	8,5 (11,0)	36,6 (30,3)
	750	0,5 (1,3)	1,2 (2,6)	8,5 (11,0)	8,5 (11,0)

$K_Q^{5\%}, K_{fc}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$



$K_Q^{5\%}, K_{fc}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$

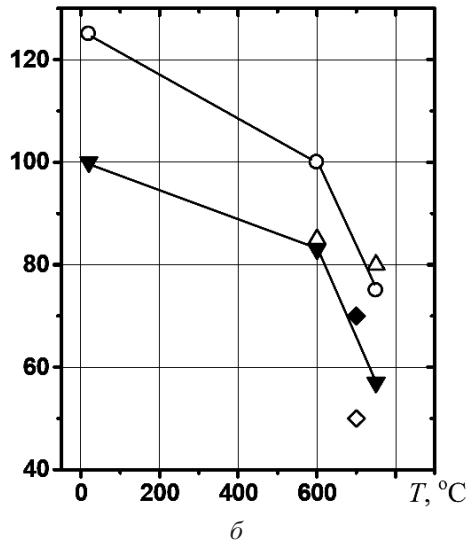


Рис. 3. Зависимость  $K_Q^{5\%}, K_{fc}$  от температуры: *a* – образец СТ-0,5 из сплава ЭП517Ш; *б* – образец СТ-1 из сплава ЭП962 (○, ● – статическое нагружение при  $K_Q^{5\%}$  и  $K_{max}$  соответственно; △, ◆, ◇ – выдержка в течение 20, 300 и 3600 с соответственно; □ – длительное статическое нагружение; ▼ –  $K_{fc}$  без выдержки).

В табл. 3 приведены размеры критической длины трещин для сплава ЭП962 в зависимости от номинальных напряжений в полотне диска, температуры и степени двухосного нагружения. Видно, что с увеличением номинальных напряжений и температуры испытаний критические размеры трещин уменьшаются, при переходе к двухосному нагружению по сравнению с одноосным в большинстве случаев отмечается их увеличение.

На рис. 4 представлены результаты исследования скорости роста трещины при длительном статическом нагружении сплава ЭП517-Ш, которые могут быть использованы при прогнозировании длительности развития трещин при трехцикловой форме цикла нагружения с выдержкой  $t_h$  при максимальной циклической нагрузке [11, 12]:

$$\frac{da}{dN} = A(K_{\max})^n + B(K_{\max})^{2p} t_T^{(1-p)} + D(C^*)(t_h - t_T), \quad (4)$$

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

$$t_T = \frac{K_1^2(1-\nu^2)}{E(n+1)C^*}. \quad (5)$$

Если время выдержки  $t_h$  меньше времени перехода  $t_T$ , то третье слагаемое в (4) отсутствует, и можно воспользоваться простым линейным суммированием скорости роста трещины от усталости и ползучести.

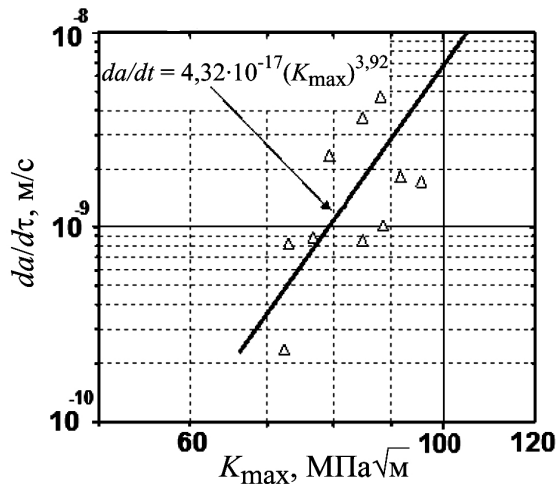


Рис. 4. Развитие трещины в образце СТ-0,5 при длительном статическом нагружении.

Для подтверждения применяемых методов были проведены экспериментальные исследования скорости роста трещин ползучести в сплаве ЭП517-Ш в зависимости от формы цикла нагружения. Анализ результатов исследований, приведенных в табл. 2 [13], показывает, что температура 350°C (и даже 400°C) не является температурой активации накопления деформаций ползучести. И только при температуре 450°C происходит увеличение скорости накопления деформаций ползучести и, следовательно, скорости роста трещин.

Для расчета периода времени, за который трещина от начального размера  $a_0$  увеличивается до критического  $a_{кр}$ , уравнение скорости роста трещины с учетом линейного суммирования усталости и ползучести запишем в виде

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{CF} = \left(\frac{da}{dt}\right)_C + \left(\frac{da}{dt}\right)_F. \quad (6)$$

При интегрировании (6) по  $a$  получим уравнение модели расчета периода развития трещины при комбинированном воздействии циклической и статической нагрузок:

$$\tau(a_{кр}) = \int_{a_0}^{a_{кр}} \frac{da}{\sum_1^p \left(\frac{da}{d\tau}\right)_{C_i} \tau_i + \sum_1^q \left(\frac{da}{dN}\right)_{F_j} N_j}, \quad (7)$$

где  $\tau_i$  – продолжительность выдержки на  $i$ -м уровне нагружения соответствующего спектра нагружений;  $N_j$  – число циклов на  $j$ -м уровне нагружения соответствующего спектра нагружений;  $\left(\frac{da}{d\tau}\right) = A(K_{max})^{m_1}$  – уравнение скорости роста трещины при длительном статическом нагружении ( $A$  и  $m_1$  – параметры, которые соответствуют скорости роста трещины при температуре  $T$ );  $\left(\frac{da}{dN}\right) = C(K_{max})^m$  – уравнение скорости роста усталостных трещин ( $C$  и  $m$  – параметры уравнения Париса).

С использованием разработанной модели долговечности (6) путем численного интегрирования выполнен расчет долговечности модельного диска турбины ГТД, в котором трещина расположена на ободе. Начальная длина трещины  $a_0 = 0,2$  мм соответствует разрешающей способности капиллярных методов дефектации и условиям применения линейной механики разрушения. Результаты расчета сравнивались с данными длительных статических испытаний при температуре  $450^\circ\text{C}$  и тех же начальных условиях.

На рис. 5 представлены результаты сравнения расчетных данных с экспериментальными.

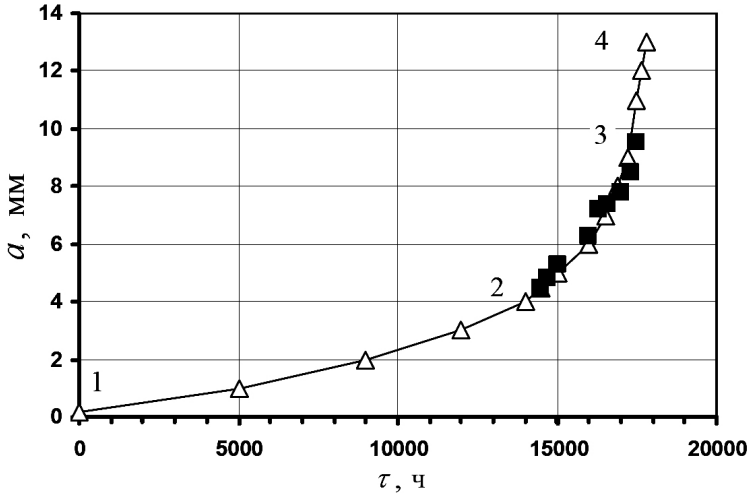


Рис. 5. Экспериментальные (темные точки) и расчетные (светлые точки) результаты прогнозирования долговечности диска с трещиной: 1 – начальное расчетное значение КИН, равное  $31 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ; 2 – начальное экспериментальное значение КИН, равное  $54 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ; 3 – значение КИН, соответствующее разрушению образца, т.е.  $K_{1c} = 93,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ; 4 – расчетное время до разрушения.

Таким образом, удовлетворительное соответствие между экспериментальными и расчетными результатами позволяет прогнозировать остаточный ресурс по предложенной модели (7).



## Выводы

1. Получен и обобщен большой объем экспериментальных данных по характеристикам трещиностойкости различных сталей, используемым в турбостроении. Исследования проводились с учетом влияния таких важных эксплуатационных параметров, как температура, режимы нагружения, двухосное нагружение.

2. Разработана методика расчета периода развития трещин до критических размеров в дисках ГТД, которые эксплуатируются при комбинированном (длительное статическое, циклическое и циклическое с выдержками) нагружении и характерной температуре.

3. Адекватность предложенной модели расчета долговечности диска турбины ГТД подтверждается удовлетворительным соответствием между результатами расчета и эксперимента.

## Резюме

Розглянуто методики прогнозування безпечного пошкодження дисків компресорів і турбін стаціонарних та авіаційних газотурбінних двигунів на стадії докритичного розвитку тріщин. Запропоновано методи оцінки міжоглядових періодів, об'ємів проведення регламентних робіт з урахуванням закономірностей такого розвитку тріщин. При цьому враховуються особливості роботи матеріалів для стаціонарних (пікові, напівпікові, стаціонарні режими) і авіаційних (типові польотні цикли) газотурбінних двигунів. За допомогою розробленої програми на прикладі диска стаціонарної газотурбінної установки проаналізовано розвиток тріщин біля різних концентраторів напружень, що дозволяє прогнозувати живучість диска та найбільш імовірне місце його руйнування.

1. *Кузнецов Н. Д.* Обеспечение надежности двигателей для гражданской авиации // Основные вопросы теории и практики надежности. – М.: Сов. радио, 1975. – С. 27–42.
2. *Нестеренко Б. Г.* Развитие нормативных требований к усталости и живучести гражданских транспортных самолетов // Пробл. машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 6. – С. 117–126.
3. *Бауер В. О., Кувейда В. К., Мельникова Г. В. и др.* Современные подходы к подтверждению прочностной надежности при сертификации авиационных газотурбинных двигателей // Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2005. – Т. 1. – 238 с.
4. *Кулішов С. Б.* Прогнозування довговічності розвитку тріщин до критичних розмірів в жароміцній сталі ЕП517-Ш при сумісному впливі втоми та повзучості: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2010. – 21 с.
5. *Покровский В. В., Ежов В. Н., Сидяченко В. Г. и др.* Результаты исследования характеристик трещиностойкости стали 12Cr–2Ni–Mo // Пробл. прочности. – 2012. – № 1. – С. 82–88.
6. *Покровский В. В., Ежов В. Н., Сидяченко В. Г.* Влияние двухосного нагружения на характеристики трещиностойкости стали 12Cr–2Ni–Mo // Там же. – 2013. – № 3. – С. 97–104.
7. *Покровский В. В., Троценко В. Т., Цейтлин В. И. и др.* К оценке ресурса дисков АГТД на стадии развития усталостных трещин. Сообщ. 2 // Там же. – 1994. – № 12. – С. 3–15.

8. РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.
9. Степаненко С. М. К вопросу о прочности дисков ГТД с учетом стадии развития усталостных трещин // Тр. междунар. науч.-техн. конф. “Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования”. – Харьков, 1997. – С. 537–539.
10. Степаненко С. М. Оценка прочности дисков газотурбинных двигателей с учетом сопротивления развитию трещин // Тез. докл. XXVII Междунар. науч.-техн. совещ. по проблемам прочности двигателей. – М.: ИМАШ–ЦИАМ–МАМИ, 1999. – С. 54–56.
11. Yoon K. B., Saxena A., and Liaw P. K. Characterization of creep-fatigue behavior under trapezoidal waveshape using  $C_t$ -parameter // Int. J. Fract. – 1993. – **59**, No. 2. – P. 95–114.
12. Saxena A., Williams R. S., and Shih T. T. A model for representing and predicting the influence of hold time on fatigue crack growth behavior at elevated temperature // Fracture Mechanics: Thirteenth Conference, ASTM STP 743, 1981. – P. 86–99.
13. Покровский В. В., Ежов В. Н., Кулишов С. Б. и др. Влияние режимов эксплуатации и конструкционных факторов на развитие трещины в стали 12Cr–2Ni–Mo // Пробл. прочности. – 2009. – № 3. – С. 66–77.

Поступила 22. 04. 2015