

Результаты исследования характеристик трещиностойкости стали 12Cr–2Ni–Mo

В. В. Покровский^а, В. Н. Ежов^а, В. Г. Сидяченко^а, Ю. С. Садовой^а,
С. Б. Кулишов^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б ГП НПКГ “Заря-Машпроект”, Николаев, Украина

Исследовано влияние температуры, формы и длительности выдержки при циклическом нагружении, а также степени двухосности нагружения на скорость роста трещин в стали 12Cr–2Ni–Mo. Показано, что все полученные результаты попадают в толерантный интервал с 90%-ным уровнем доверительной вероятности.

Ключевые слова: коэффициент интенсивности напряжений, циклическое нагружение, скорость роста трещин, двухосное нагружение.

Надежность и долговечность элементов газотурбинных установок (ГТУ) имеют большое экономическое значение. Предполагается, что детали ГТУ не содержат трещиноподобных дефектов, однако из-за особенностей конструкции в них всегда присутствуют концентраторы напряжений, которые являются источниками их появления. Как отмечалось ранее [1], наиболее ответственными деталями ГТУ являются диски компрессора и турбин, разрушение которых не локализуется внутри двигателя. Согласно техническим условиям, срок службы ГТУ определяется следующим образом: при заявленном ресурсе с 95%-ной вероятностью не более чем в одном диске из партии (например, 500 штук) возможно появление трещины длиной до 0,75 мм. Однако такой подход при эксплуатации весьма консервативен и не достаточно обоснован [2], что может привести к досрочном снятии двигателя с эксплуатации.

В работе [1] представлена циклограмма нагружения ГТУ в зависимости от класса использования. Анализ условий эксплуатации показывает, что основным повреждающим фактором дисков являются центробежные силы, а при длительной работе – еще и воздействие температуры, определяющей прочностные характеристики материала.

Материалом для исследования служила жаропрочная хромоникелевая сталь 12Cr–2Ni–Mo. В табл. 1 представлены основные механические характеристики стали в зависимости от температуры.

В табл. 2 приведены распределенные по радиусу модельного диска значения температур, упругих напряжений, степени двухосности ($\lambda = \sigma_R / \sigma_\theta$), соответствующие номинальной мощности двигателя, полученные по программе расчета осесимметричных оболочек вращения на основе модифицированного метода конечных элементов [3].

Режимы эксплуатации ГТУ [1] и оценка распределения температур и напряжений по полотну диска (табл. 2) позволили определить границы исследования характеристик трещиностойкости.

Т а б л и ц а 1

Механические характеристики стали 12Cr–2Ni–Mo при различной температуре

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
20	1030	785	2,14	14,0...17,0	55...60
300	888	688	1,96	–	–
350	863	674	1,91	–	–
400	844	664	1,81	10,0...11,5	61...64
450	775	600	1,83	–	–

Т а б л и ц а 2

Значения температур и напряжений по радиусу диска ГТУ

$R, \text{мм}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_R, \text{МПа}$	$\sigma_\theta, \text{МПа}$	λ
115	350	0	530	0
300	280	437	391	1,120
427	290	414	397	1,040
554	290	425	404	1,052
627	400	–59	250	–0,236
663	335	266	334	0,796
684	335	82	276	0,293

В табл. 3 представлены виды нагружения при исследовании скорости роста трещин (СРТ) в стали 12Cr–2Ni–Mo. Там же приведены типы используемых образцов, вид нагружения, температура и значения коэффициентов зависимости Париса, описывающей линейный участок кинетической диаграммы усталостных разрушений (КДУР). Одноосное нагружение проводили с использованием стандартных компактных образцов согласно рекомендациям регламентирующих документов [4].

Ранее [1] было показано, что при циклическом нагружении с выдержкой время перехода от маломасштабной ползучести к установившейся на несколько порядков выше времени выдержки и реального времени проводимых экспериментов. Кроме того, отмечалось, что при выбранных температурах и видах нагружения в рассматриваемом диапазоне изменения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) различие в скоростях роста трещин усталости незначительное.

Исследования по оценке влияния степени двухосности нагружения λ на характеристики циклической трещиностойкости проводили на крестообразных образцах. До настоящего времени нет нормативных документов относительно выбора размеров и форм таких образцов. При выборе типоразмеров образцов руководствовались геометрическими размерами изучаемого объекта (диска), созданием плосконапряженного состояния в рабочей площадке образца, возможностями испытательного оборудования. Для исключения перераспределения прикладываемой нагрузки на деформирование концов крестообразного образца в хвостовике были сделаны прорезы, что позволяет создать однородно деформируемые области достаточных размеров, в которых напряжения мало зависят от формы сопряжения хвостовиков с рабочей частью и могут быть определены как отношение нагрузки к площади поперечного сечения.

Т а б л и ц а 3

Режимы нагружения при исследовании СРТ в стали 12Cr–2Ni–Mo, значения C и n зависимости Париса

№ эксперимента	Тип образца	Циклическое нагружение		λ	$T, ^\circ\text{C}$	C	n
		Синусоидальное, Гц	Время выдержки, с				
1	СТ-0,5	15		0	20	$5,170 \cdot 10^{-11}$	2,201
2		15		0	450	$2,28 \cdot 10^{-12}$	3,100
3			20	0	300	$4,2 \cdot 10^{-12}$	2,800
4			20	0	450	$6,0 \cdot 10^{-12}$	2,792
5	Крестообразный		20	0	450	$3,54 \cdot 10^{-11}$	2,430
6	СТ-0,5		3600	0	350	$4,45 \cdot 10^{-13}$	3,340
7			3600	0	400	$7,31 \cdot 10^{-13}$	3,367
8			3600	0	450	$7,045 \cdot 10^{-13}$	2,595
9	Крестообразный		20	0,5	450	$3,22 \cdot 10^{-11}$	2,380
10			20	0,5	350	$6,25 \cdot 10^{-11}$	2,179
11			20	0,5	400	$2,02 \cdot 10^{-10}$	1,930
12	Крестообразный	1		1,0	450	$1,48 \cdot 10^{-11}$	2,437
13			20	1,0	350	$4,74 \cdot 10^{-13}$	3,524
14			20	1,0	400	$6,74 \cdot 10^{-12}$	2,954
15			20	1,0	300	$3,1 \cdot 10^{-10}$	1,820
16			20	1,0	450	$3,12 \cdot 10^{-12}$	2,869

Согласно результатам исследований характер влияния двухосного нагружения на СРТ усталости в сталях противоречивый [5–7]. С увеличением двухосного нагружения СРТ может возрастать, уменьшаться и не изменяться по сравнению с таковой при одноосном нагружении.

В общем виде между размерами образца, формой и длиной трещины, величиной приложенных напряжений и КИН существует зависимость

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi l} F(l). \quad (1)$$

С помощью программного комплекса [3] были вычислены значения весовой функции $F(l)$, что позволяет определить K_1 при различной степени двухосности нагружения ($\lambda = 0; 0,5; 1$) и, следовательно, построить зависимость СРТ от K_1 . В табл. 3 представлены результаты таких исследований при различных температурах и степени двухосности нагружения.

На рис. 1 в двойных логарифмических координатах приведены результаты исследований согласно табл. 3. Каждая зависимость СРТ при циклическом нагружении от КИН была получена по результатам 15–30 наблюдений. Поскольку при исследовании этих зависимостей результаты измерений СРТ и КИН носят случайный характер, необходимо оценить выборочный коэффициент корреляции r между случайными величинами, который позволяет определить “тесноту” связи между ними. Коэффициент корреляции определяли по формуле [8]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (K_{1i} - \bar{K}_1)(V_i - \bar{V})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (K_{1i} - \bar{K}_1)^2 \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}}, \quad (2)$$

где K_{1i}, V_i – текущие значения КИН и СРТ; \bar{K}_1, \bar{V} – средние значения.

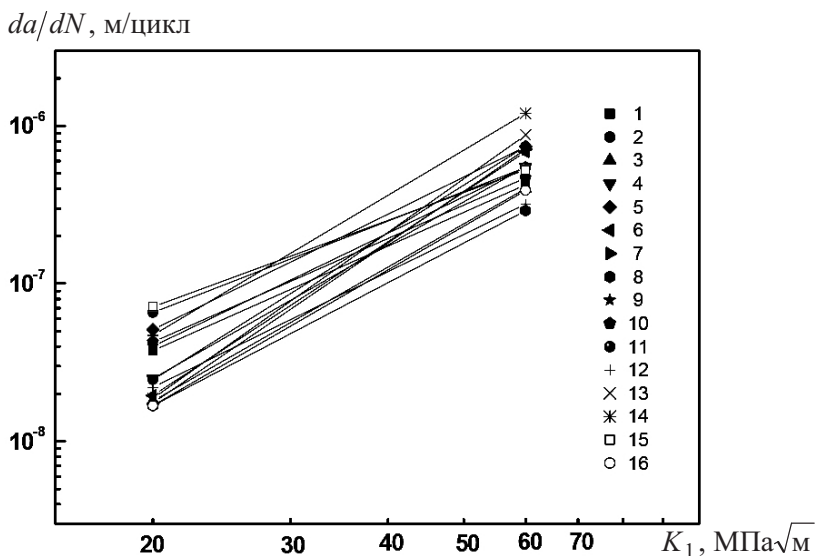


Рис. 1. Диаграммы усталостного разрушения стали 12Cr-2Ni-Mo при различных условиях нагружения: 1–16 – номера экспериментов в табл. 3.

Согласно результатам работы [9], значения коэффициентов корреляции, находящиеся в диапазоне $0,95 \leq |r| \leq 1,0$, свидетельствуют о практически функциональной связи между случайными величинами K_{1i} и V_i . Расчеты, выполненные при построении КДУР (табл. 3), показывают весьма сильную связь между указанными величинами, при этом коэффициенты корреляции принимают значения от 0,887 до 0,957.

Из анализа расположения КДУР видно, что, несмотря на различные условия нагружения (табл. 3), они находятся в полосе разброса не более десяти раз в рассматриваемом диапазоне изменения КИН, что согласуется со стохастической природой усталостного разрушения [10] (рис. 1). Для про-

верки гипотезы нормального закона распределения случайных величин СРТ при каждом фиксированном значении КИН использовали критерий Дэвида [11] для 10%-ного уровня значимости. Установлено, что для трех выбранных КИН (20, 40, 60 МПа $\sqrt{м}$) значения критерия Дэвида находятся на границе критических. Следовательно, гипотеза не опровергнута.

С целью проверки принадлежности закона распределения случайных величин СРТ к одному из общепринятых воспользуемся рекомендациями работы [8].

По формулам оценки выборочных параметров распределения случайных величин вычисляли показатели асимметрии

$$S_k = \frac{m_3}{S_y^3}, \quad (3)$$

где S_y^2 – дисперсия случайных величин, $S_y^3 = \left(\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right)^3$; $\bar{X}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ – среднее; m_3 – центральный момент распределения, $m_3 = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3$.

Значение показателя асимметрии указывает на отличие рассматриваемого распределения от нормального. Расчеты по формуле (3) показывают существенное отклонение показателя асимметрии от нуля (соответственно 0,8112; 0,758; 1,348) для трех ранее выбранных значений КИН.

Для описания рассеяния значений СРТ при фиксированных КИН использовали плотность распределения по Вейбуллу [12]:

$$P(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x-c}{a} \right)^{b-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x-c}{a} \right)^b \right\}, \quad (4)$$

где x – случайная величина; a, b – параметры масштаба и формы, $a > 0, b > 0$; c – параметр сдвига.

Использование закона распределения Вейбулла имеет преимущества перед нормальным распределением. Считается, что распределение Вейбулла более гибкое, поскольку в него входят три параметра, которые позволяют точнее описать закономерности рассеяния случайных величин.

В практических оценках при определении толерантного интервала для случайной величины СРТ с 95%-ной доверительной вероятностью руководствовались рекомендациями [12].

На рис. 2 приведены средние значения СРТ во всем диапазоне изменения КИН, а также верхняя и нижняя границы попадания СРТ в интервал с доверительной вероятностью 90%.

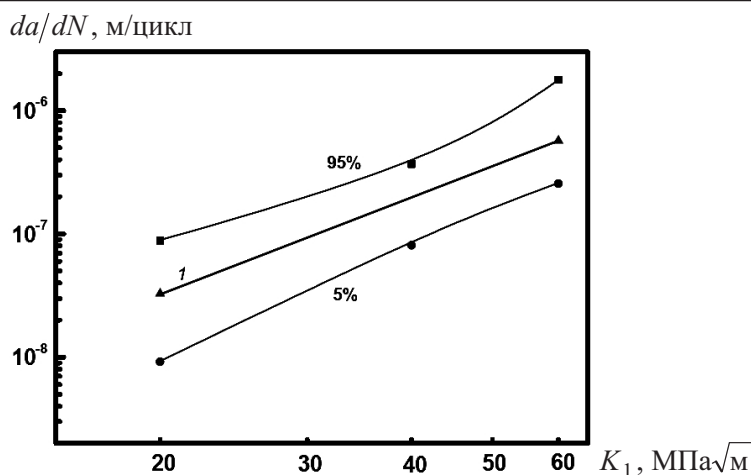


Рис. 2. Доверительный интервал для СРТ в зависимости от значений КИН: 1 – по среднему значению СРТ.

Выводы

1. Статистическая обработка результатов исследования СРТ в стали 12Cr–2Ni–Mo при циклическом нагружении с учетом вида нагружения показала, что функция распределения подчиняется закону Вейбулла.

2. Разработана и опробована методика вероятностного прогнозирования СРТ в материале диска ГТУ при эксплуатационных режимах нагружения.

Резюме

Досліджено вплив температури, форми і терміну витримки при циклічному навантаженні та ступеня двовісності навантаження на швидкість зростання тріщин у сталі 12Cr–2Ni–Mo. Показано, що всі результати дослідження потрапляють в толерантний інтервал із 90%-ним рівнем надійної імовірності.

1. Покровский В. В., Ежов В. Н., Кулишов С. Б. и др. Влияние режимов эксплуатации и конструкционных факторов на развитие трещин в стали 12Cr–2Ni–Mo // Пробл. прочности. – 2009. – № 3. – С. 66 – 77.
2. Tschirne K. U. and Holzbecher W. Effectiveness of Modern Lifting Concepts- Consideration of Economical Aspects Concerning in Group A Parts of Military Engines // NATO RTO-MP-17. – Paper 2. – 1999.
3. Кандун А. Б., Морозов Е. М., Ольферьева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
4. ASTM E647. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. – ASTM, 2001. – 43 p.
5. Miller K. J. Fatigue under complex stress // Metal Sci. – 1977. – **11**, No. 8-9. – P. 432 – 438.
6. Adams N. J. Some comments ot the effect of biaxial stress on fatigue crack growth // Eng. Fract. Mech. – 1973. – **5**, No. 4. – P. 983 – 992.

7. Cotterell B., Lee E., and Mai Y. W. Mixed mode plane stress ductile fracture // Int. J. Fract. Mech. – 1982. – **20**. – P. 243 – 250.
8. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
9. Шиндовский Э., Шюрц О. Статистические методы управления качеством. Контрольные карты и планы контроля / Пер. с нем. – М.: Мир, 1976. – 597 с.
10. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.
11. Закс Л. Статистическое оценивание. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.
12. ГОСТ 11.007-75 (СТ СЭВ 877-78). Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров распределения Вейбулла. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 30 с.

Поступила 04. 06. 2010